



ISSN 2307-3489 (Print)  
ISSN 2307-6666 (Online)



---

# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№ 2(110)

---

•• 2025 ••

Український державний університет науки і технологій

# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

70,70%

**Науковий журнал**

**№ 2 (110) 2025**

Виходить 4 рази на рік ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

*Автоматизовані та телематичні системи на транспорті*  
*Екологія та промислова безпека*  
*Економіка та управління*  
*Експлуатація та ремонт засобів транспорту*  
*Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси*  
*Залізнична колія та автомобільні дороги*  
*Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання*  
*Матеріалознавство*  
*Машинобудування*  
*Рухомий склад і тяга поїздів*  
*Транспортне будівництво*

Дніпро

2025

Засновник:  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ  
ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА  
ВИПУСКОВИЙ РЕДАКТОР

Козаченко Д. М., доктор технічних наук  
Банніков Д. О., доктор технічних наук  
Колесникова Т. О., кандидат наук  
із соціальних комунікацій

*ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:*

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., УДУНТ (Україна); Богдявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., УДУНТ (Україна); Вакулєнко І. О., УДУНТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головкова Л. С., УДУНТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський державний технічний університет (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., УДУНТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнецов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Мурадян Л. А., УДУНТ (Україна); Сохацький А. В., Університет митної справи та фінансів (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., УДУНТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютєкін О. Л., УДУНТ (Україна); Шинкаренко В. І., УДУНТ (Україна).

Журнал зареєстровано Національною Радою України з питань телебачення і радіомовлення, рішення № 924 від 28.09.2023 р. Ідентифікатор медіа: R30-01395.  
Видання внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки).  
Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін.  
Друкується за рішенням вченої ради університету від 25.06.2025 р., протокол № 13

Видавець Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022 р.

Адреса засновника вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010  
та редакції тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: [stp.journal@ust.edu.ua](mailto:stp.journal@ust.edu.ua);  
сайт журналу: <http://stp.ust.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:

1936–1993 рр. – «Труди Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;

1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);

2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);

2013–2022 рр. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;

з 2023 р. – «Наука та прогрес транспорту»

Ukrainian State University of Science and Technologies

# NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

=

# SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

**Scientific journal**

**No. 2 (110) 2025**

Once a quarter ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

*Automated and Telematic Systems on Transport*  
*Ecology and Industrial Safety*  
*Economics and Management*  
*Operation and Repair of Transport Means*  
*Electric Transport, Power Systems and Complexes*  
*Railroad and Roadway Network*  
*Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling*  
*Material Science*  
*Mechanical Engineering*  
*Rolling Stock and Train Traction*  
*Transport Construction*

Dnipro

2025

Founder:

UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Editor-in-Chief  
Deputy Chief Editor  
Executive Editor

Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences  
Bannikov D. O., Doctor of Technical Sciences  
Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

*EDITORIAL BOARD MEMBERS:*

Avramovic Z. Ž., Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., USUST (Ukraine); Bodnar B. E., USUST (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., USUST (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., USUST (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluji National Technical University (Ukraine); Muradian L. A., USUST (Ukraine); Sokhatsky A. V., University of customs and finances (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., USUST (Ukraine); Shinkarenko V. I., USUST (Ukraine); Śladkowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., USUST (Ukraine); Vakulenko I. O., USUST (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine)

Journal  
was registered

Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 924 dated 28.09.2023. Media identifier: R30-01395

Edition is included in category B «List of scientific specialized publications of Ukraine» by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine no. 409 from 17.03.2020 (technical sciences).

Journal is registered in the International Catalogue of periodicals: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова, etc.

Published according to the Academic Council decision of the University from 25.06.2025, Protocol no. 13

Publisher Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro)  
Certificate of Publisher ДК no. 7709 from 14.12.2022

Address  
of Founder

Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;  
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua; journal site: <http://stp.ust.edu.ua/>

Edition is being published since 1936:

1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;

1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);

2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);

2013–2022 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;

since 2023 – «Наука та прогрес транспорту»

# АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

UDC [656.259.1:629.4]-048.24

A. V. ZUBKO<sup>1\*</sup>, V. I. SHCHEKA<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail andrii.v.zubko@gmail.com, ORCID 0009-0001-1861-5017

<sup>2\*</sup>Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail v.i.shcheka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2184-2827

## Consideration of the Upper Error Bound of Measurement Complex in the Analysis of Digitized Signals

**Purpose.** This work aims to: enhancing the reliability of certification tests for new rolling stock by integrating measurement system error considerations into the data analysis process; ensuring a more precise evaluation of compliance with safety and performance standards, minimizing the risk of undetected defects that could emerge during operation; improving risk assessment by reducing measurement uncertainties, thereby strengthening the decision-making process for rolling stock approval. **Methodology.** Analyzing existing approaches to certifying new rolling stock in accounting for measurement system errors. Developing a method for systematically integrating these errors into the data analysis process to enhance result accuracy. Assessing the impact of this approach on certification reliability and its effectiveness in identifying potential operational risks before deployment. **Findings.** An improved certification process incorporating measurement system error considerations has been proposed. The study demonstrates that this approach significantly reduces the probability of overlooking defects that may only become apparent during operation, thereby increasing the overall reliability of certification tests. **Originality.** A method for assessing the reliability of certification test data while considering measurement system errors has been developed. It has been proven that integrating these data into the test analysis process improves the accuracy of predicting the operational reliability of rolling stock and enhances the overall effectiveness of certification procedures. **Practical value.** The proposed approach enhances railway transport safety by ensuring a more reliable and accurate certification process for new rolling stock. This is particularly relevant in the context of Ukraine's railway fleet modernization, including the introduction of Hyundai Rotem and Tarpan electric trains, as well as Škoda locomotives. By refining certification procedures, this methodology contributes to safer and more efficient railway operations.

*Key words:* certification testing; digital signal analysis; safety; interference; electromagnetic compatibility; traction current; harmonic

### Introduction

Railway transport plays an important role in the economy, infrastructure development, and ensuring the sustainable movement of goods and passengers in Ukraine. To enhance productivity, specifically by increasing passenger and freight transportation volumes, Ukraine's railway systems are continuously being modernized.

Some modernization efforts focus on improving transportation safety, while others aim to enhance

management systems, including monitoring and planning improvements. These advancements help optimize transportation operations and increase the number of trips within a given period.

Such modernization efforts are feasible, but they largely depend on train speeds across the country's railway network. Increasing train speeds significantly boosts the overall capacity of the railway system. Higher travel speeds open new possibilities for improving management systems. These and many

other factors influence the quantity, quality, and, most importantly, the safety of transportation. While ensuring safety remains the top priority for Ukraine's railways, increasing train speeds is a key factor in improving their efficiency.

Speed enhancement is achieved through the modernization or replacement of certain locomotive components and systems, such as braking systems, control systems, power circuits, and cooling systems. Increasing engine power while maintaining locomotive stability and safety on the tracks plays a crucial role in achieving higher speeds. [5]

Since early 2012, Ukraine's railway network has undergone modernization efforts aimed at increasing train speeds. During this period, the following new locomotives and electric trains were introduced:

- Hyundai Rotem: Electric trains from Hyundai Rotem began operation in 2012;
- Škoda: Škoda locomotives also entered service in 2012;
- Tarpan: «Tarpan» electric trains, produced by the Kryukov Railway Car Building Works, began operation in 2014.

These modernization efforts have improved the efficiency of railway transport, ensuring faster and more comfortable transportation of both passengers and cargo.

### Purpose

The study focuses on the certification testing process of railway rolling stock, with particular emphasis on assessing electromagnetic compatibility with railway automation and telemechanic systems. The article examines existing approaches to conducting tests, data analysis, and evaluating compliance with international standards. One of the key aspects of this research is the issue of insufficient consideration of measurement system errors during the digital analysis of signals, particularly the return traction current.

Measurement inaccuracies play a crucial role in the certification process, as even minor deviations can affect the results and lead to incorrect assessments of electromagnetic impact levels. In most cases, data on measurement uncertainty is recorded in test protocols; however, it is not always factored into the final data processing. This creates a risk where measured values may be close to the maximum permissible limits, but without accounting for

possible deviations, potentially leading to an incorrect approval of rolling stock for operation.

This study aims to substantiate the need for a more precise approach to certification testing, incorporating the influence of measurement system errors, especially in critical scenarios. Such an approach will not only enhance result accuracy but also provide an additional layer of safety when introducing new rolling stock into service. A proper analysis of electromagnetic compatibility is a key factor in ensuring the reliability of railway infrastructure and preventing potential risks to signaling, communication, and automatic train control systems.

*The process of conducting certification tests.* Introducing a new rail vehicle is a complex and highly responsible process. Testing is conducted to determine the feasibility of operating new rolling stock on the railway network while adhering to all safety regulations and measures for passenger and freight transportation.

These tests assess the safety level of using new rail vehicles. Inspections are carried out by all railway departments, including the locomotive depot, signaling and communications service (SCS), track service, and power supply service. These departments conduct a detailed analysis and testing to ensure the new equipment meets all safety and operational requirements.

Certification studies by the signaling and communications service focus on identifying potential risks that a new rail vehicle may pose to station, track, or level crossing equipment. Particular attention is given to verifying the electromagnetic compatibility of the new equipment with locomotive control systems, such as automatic block signaling (ABS), automatic train signaling (ATS), microprocessor interlocking (MPI), and electric interlocking (EI). Additionally, tests are conducted to assess potential interference with communication systems, including dispatching and station communication, ensuring that interactions with new locomotives do not cause operational disruptions. [1, 4]

In tests assessing electromagnetic compatibility with SCS devices, special attention is given to return traction current, which flows back to the traction substation through the rails. Significant distortions in return traction current can adversely affect the operation of signaling and communication de-

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

vices, potentially leading to system failures, violations of safe transportation regulations, and risks to passenger and personnel safety, as well as the integrity of transported goods.

Rolling stock electromagnetic compatibility tests are conducted following the rules and standards of international railway electromagnetic compatibility regulations [6–10]. These standards establish permissible levels of return traction current for different frequency ranges depending on the type of current (DC or AC) and dictate the procedures for measurement and data analysis.

Before data collection, all measuring devices undergo accuracy verification in accredited metrology laboratories. This procedure determines the accuracy of each device and assesses the overall measurement system's potential margin of error.

During testing, current levels are monitored to ensure they do not exceed permissible values within the specified frequency ranges outlined by the standards. Studies are conducted across all locomotive operating modes: coasting, braking, acceleration, idle, traction, and regeneration. If return traction current studies reveal violations (exceeding permissible limits according to the established standards), the locomotive is not approved for operation until the parameters are brought into compliance with regulatory requirements, as confirmed by subsequent testing.

The digitization of return traction current is performed using a combination of devices, including current sensors (such as Rogowski coils, current clamps, etc.), an amplification and conversion unit, an analog-to-digital converter (ADC), a data storage device, and a personal computer (PC). Once data is collected, the process of digital analysis and signal processing begins.

### Methodology

To ensure the safety of railway rolling stock and railway automation and telemechanic systems, a digital data analysis is conducted following field tests. Particular attention is given to the analysis of the return traction current signal, which is verified for compliance with electromagnetic compatibility requirements. These requirements are outlined in the international standard IEC 62236-3-1:2018, specifically in subsection 6.1 and clause 6.2.2. Compliance with these standards is critically important for preventing potentially hazardous situations arising

from electromagnetic interference between new rolling stock and existing automation systems. [8, 11].

Although data on the measurement system's margin of error is recorded in the test protocol, it is often not considered during digital analysis, as a certain level of error is deemed acceptable. However, when assessing the safety of new rolling stock, it is necessary to account for the worst-case scenario. This means that the measurement system's error should be taken into consideration during signal analysis, especially when the digitized signal level is close to the maximum permissible current threshold. In such cases, there is a risk that measurement uncertainty could lead to an exceedance of this threshold.

Consider a test signal example that clearly illustrates this issue. The Fig. 1 presents a section of the digitized signal, which serves as an analog of a real return traction current signal of a locomotive.

Without digital processing, it is difficult to determine whether the signal contains harmful interference that exceeds the maximum allowable current level within specific frequency ranges. To enhance clarity, a band-pass filtering method will be applied to the original signal using the MATLAB development and simulation environment. As an example, we will examine interference at a frequency of 420 Hz.

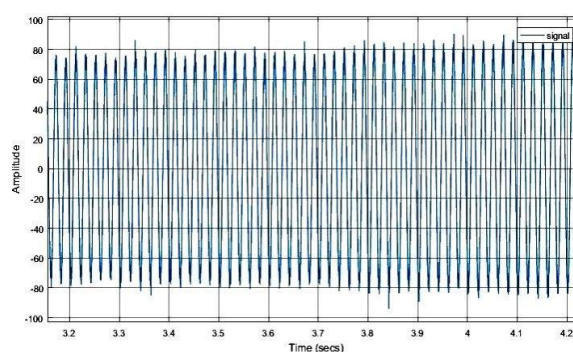


Fig. 1. The original signal of the locomotive's return traction current

According to testing standards, the frequency range should be between 408 and 432 Hz, the maximum allowable amplitude must not exceed 0.35 A, and the duration should be no less than 0.3 seconds.

For the analysis, a Chebyshev Type II infinite impulse response (IIR) band-pass filter will be used. The transfer function of this filter is defined according to equation (1):

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)}, \quad (1)$$

where  $z$  is a complex variable,  $z = e^{jw}$ , and  $w$  represents the frequency in radians;  $B(z)$  and  $A(z)$  are polynomials in  $z$  with coefficients corresponding to the numerator and denominator of the filter's transfer function [3].

To achieve a sharp attenuation characteristic, a 44th-order filter was modeled. The transfer function of this filter is presented in equation (2), and the amplitude-frequency characteristic is shown in Fig. 2.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{44} z^{-44}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{44} z^{-44}} \quad (2)$$

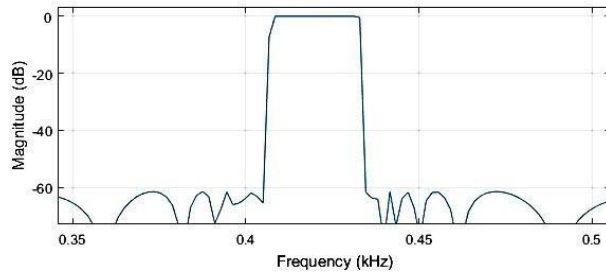


Fig. 2. The amplitude-frequency characteristic of the bandpass filter 408–432 Hz

The results of the digital filtering performed using the modeled filter are presented in Fig. 3, *a*. The figure also shows the limit boundaries of the signal amplitude: +0.35 A and –0.35 A (max and min, respectively). The analysis of the original signal with filtering allowed for visualizing the signal characteristics within the specified limits.

The analysis of this segment revealed that, from 3.38 to 3.75 seconds (0.37 seconds), the effective value of the harmonic component is 0.349 A (see Fig. 3b). According to the international standard [8], this value does not exceed the maximum allowable limit (0.35 A), and therefore such a deviation would not be considered potentially dangerous.

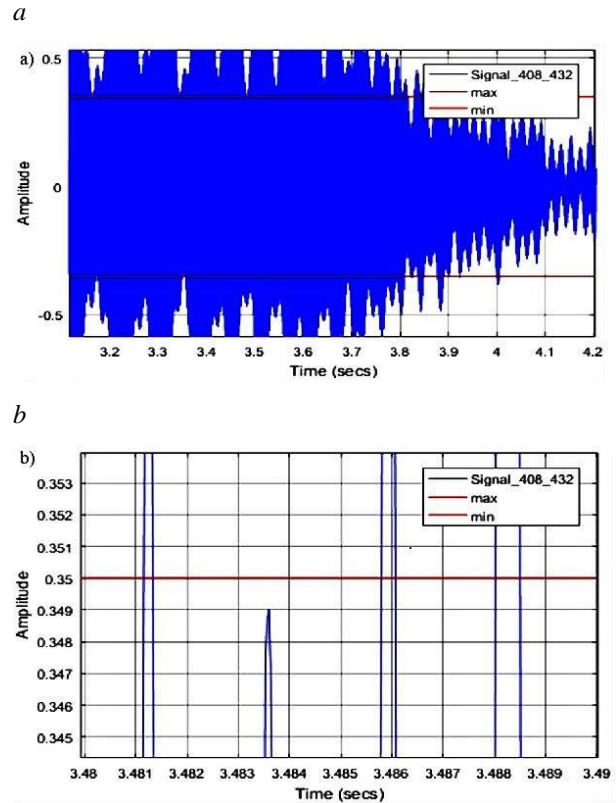


Fig. 3. The original signal after digital filtering in the range of 408–432 Hz:

*a* – Filtered signal,  
*b* – Close-up of the signal's minimum peak section

Error accounting in data analysis can be carried out using two methods.

The first method involves analyzing the original measurement data, followed by accounting for the error at the final stage. For example, to correct the measurement results and obtain the maximum possible effective value considering the error (EVP), equation (3) can be used. Thus, with a measurement system error of, for instance, 1 %, the worst-case effective value would be 0.3525 A, which already exceeds the maximum permissible value.

$$EVP = \frac{EV \cdot P}{100}, \quad (3)$$

where  $EV$  is the effective value of the harmonic component;  $P$  is the measurement system error (%).

The second method involves preliminarily increasing the values of all points in the original signal by the amount of the error before starting the analysis. This approach requires the use of software such as Excel or MATLAB, as well as some coding

skills. To implement this method, the following algorithm should be applied.

Let the set of original points be denoted as  $X$  :

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\},$$

where  $x_i$  is the value of the  $i$ -th point;  $n$  is the total number of points.

The set of points with increased values will have a similar structure:

$$X' = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_n\}.$$

Thus, the entire set of points  $X$  is modified by the following equation (4):

$$X' = \left\{ x_1 + \frac{x_1 \cdot P}{100}, x_2 + \frac{x_2 \cdot P}{100}, \dots, x_n + \frac{x_n \cdot P}{100} \right\}, \quad (4)$$

where  $P$  is the measurement system error (%).

To confirm the correctness of the second method, let us first increase the values of the points in the original signal by the amount of the error (1 %) using equation (4). The new points  $X'$  are then filtered using the previously modeled band-pass filter at frequencies between 408 and 432 Hz. Next, we analyze the filter results for the section of the signal where the lowest peak of the effective value is observed (Fig. 4).

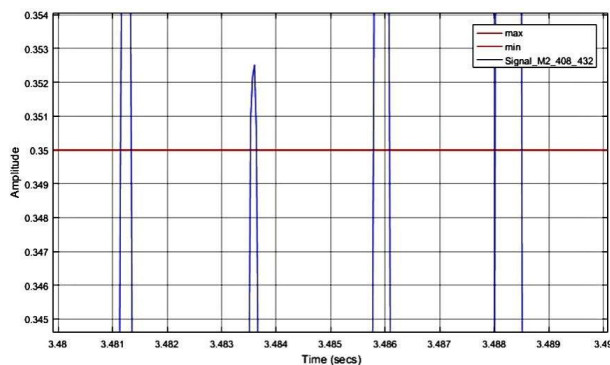


Fig. 4. The signal after digital filtering in the range of 408–432 Hz, accounting for a 1 % measurement system error

A comparison of the results from both methods shows that they align: the effective value, considering the error, is 0.3525 A, which confirms the correctness of the chosen approach. This value also exceeds the maximum allowable value and, as in the first method, represents a potentially dangerous violation.

Although the second method is more complex, it provides a more accurate assessment of the data during analysis, leading to a better understanding of potential exceedances of allowable harmonic levels under the worst-case conditions associated with measurement system errors.

This method is preferable as it allows for the consideration of actual data and helps identify potential issues that might remain unnoticed in a simple analysis of the original signals. Applying the measurement error to each data point in the signal set enables the detection of areas that could be overlooked without accounting for the error. As a result, the likelihood that previously normal signal sections may exceed the permissible limits increases. This approach allows for a more thorough analysis and identification of potential violations, which could be critical in real-world operating conditions.

## Findings

The results of the study showed that ignoring the measurement system's error could lead to the omission of potentially dangerous sections of the return traction current. This is particularly critical when the signal is close to the maximum permissible levels, which could result in non-compliance with electromagnetic compatibility requirements and potential operational issues. Using a methodology that accounts for measurement errors during testing allows for a more accurate assessment of risks and helps prevent potential failures in real-world operating conditions. This approach enhances safety and reliability in the operation of railway rolling stock, preventing potential hazards that might otherwise go unnoticed in standard signal analysis.

This method can also be valuable for developing more effective monitoring and management strategies for railway systems. Including errors in the calculations not only helps avoid potential accidents but also improves overall diagnostics and equipment tuning, thus ensuring stable and safe operation throughout the entire lifecycle of the rolling stock.

## Originality and practical value

The originality of the research lies in the approach to accounting for measurement system errors when analyzing locomotive return traction current. Unlike traditional methods, where such errors are often ignored, the proposed methodology allows

for a more accurate assessment of the signal characteristics, revealing potentially hazardous deviations. This solution represents a significant advancement in the field of safety, as it enables the prediction and prevention of issues that could arise during operation.

The practical value of this approach lies in its potential to enhance the reliability and safety of railway rolling stock operation. By incorporating error consideration in signal analysis, the methodology ensures accurate evaluation of electromagnetic interference impacts and guarantees compliance with international standards. The implementation of this approach in testing and monitoring systems will help ensure a higher level of safety for new locomotives, improving operational performance and preventing potentially dangerous situations.

### Conclusions

The main goal of certification testing is to ensure that new locomotives comply with regulatory requirements and do not pose a threat to traffic safety. Considering the measurement system's error margin allows for reducing the uncertainty during digital analysis, enabling a more accurate assessment of the locomotive's compliance with established standards. If any discrepancies are found during testing, the locomotive is sent for adjustments, followed by re-testing to confirm its safety and readiness for operation. [2]

Although the method of increasing the signal points by the error margin is a more complex process, its application significantly improves the accuracy of the analysis. This approach allows not only for considering the errors of the measurement system but also for identifying areas of the signal that, without accounting for the error, could remain within the acceptable range. As a result, the probability of detecting potentially dangerous areas, which could be overlooked during standard analysis, increases. Therefore, the application of this method contributes to a more detailed evaluation of

harmonics and ensures a higher precision in certification.

This approach places additional demands on locomotive manufacturers, as the allowable deviations from the standard during testing are narrowed by the error margin of the measurement system. This means that additional factors must be considered to meet stringent safety standards and eliminate potential risks. Despite the increased complexity of the process, more thorough design, testing, and certification ultimately contribute to improving the safety of railway transportation.

The certification process is a complex and critical procedure. Any inaccuracy or negligence in checking the electromagnetic compatibility of a new rolling stock with already existing and operational railway automation systems can result in the introduction of these units into operation, thereby endangering the lives of passengers, staff, and the integrity of transported goods. Therefore, in research, especially in the transport industry, even the smallest probability of failure must be considered, and measures must be taken to prevent it, ensuring that the possibility of its occurrence is eliminated.

In the future, it is planned to conduct a detailed assessment of the feasibility of integrating the proposed methodology into existing certification systems. Special attention will be paid to its adaptability to the regulatory frameworks of other countries and international standards, such as those defined by the European Union, ISO, and IEC. This step is essential for ensuring that the methodology can be effectively applied in a global context and contribute to harmonizing certification procedures across borders. Based on the results of this assessment, additional scientific publications are planned, which will present the outcomes of the analysis and offer recommendations for practical implementation in international certification workflows. These publications will also explore potential challenges and limitations, ensuring a comprehensive approach to improving railway safety and measurement accuracy.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Журавльов А. Ю., Саблін О. І., Щека В. І., Яшук К. І. Підвищення завадостійкості рейкових кіл в умовах впливу тягового струму. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2024. № 27. С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2024/307339>
2. Павленко В. Сертифікаційні випробування як інструмент підвищення якості продукції. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 10. С. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2021.10.11>

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

3. Andreas A. (2018). *Digital Filters: Analysis, Design, and Signal Processing Applications*. Victoria, Canada : McGraw Hill. 976 p.
4. Havryliuk V. I. Modelling of the return traction current harmonics distribution in rails for AC electric railway system. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. 2018. P. 251–254. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485160>
5. Hu H., Liu Y., Li Y., He Z., Gao S., Zhu X., Tao H. Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*. 2024. Vol. 32. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6>
6. IEC 62236-1:2018. *Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 1: General*. Official Edition, 2018. 44 p. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62647>
7. IEC 62236-2:2018. *Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world*. Official Edition, 2018. 86 p. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62648>
8. IEC 62236-3-1:2018. *Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-1: Rolling stock - Train and complete vehicle*. Official Edition, 2018. 63 p. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62681>
9. IEC 62236-3-2:2018. *Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-2: Rolling stock - Apparatus*. Official Edition, 2018. 69 p. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62682>
10. Pous M., Azpurua A. M., Oliva J., Aragon M., Gonzalez I., Silva F. Full Time Domain EMI Measurement System Applied to Railway Emissions According to IEC 62236-3-1/EN 50121-3-1 Standards. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. 2018. P. 260–266. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485173>
11. Salles R. S., Asplund R., Rönnerberg S. K. Mapping and assessment of harmonic voltage levels for railway traction supply stations in Sweden. *Electric Power Systems Research*. 2025. Vol. 239. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111195>

A. В. ЗУБКО<sup>1\*</sup>, В. І. ШЕКА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта andrii.v.zubko@gmail.com, ORCID 0009-0001-1861-5017

<sup>2\*</sup>Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта v.i.shcheka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2184-2827

## Урахування верхньої межі похибки вимірювального комплексу під час аналізу оцифрованих сигналів

**Мета.** Ця робота спрямована на: підвищення надійності сертифікаційних випробувань нового рухомого складу шляхом інтеграції врахування похибок вимірювального комплексу в процес аналізу даних; забезпечення більш точної оцінки відповідності вимогам безпеки та експлуатаційних характеристик, мінімізація ризику невиявлених дефектів, які можуть проявитися під час експлуатації; поліпшення оцінки ризиків за рахунок зменшення невизначеності вимірювань, що підвищує обґрунтованість прийняття рішень щодо допуску рухомого складу до експлуатації. **Методика.** Проведено аналіз наявних підходів до сертифікації нового рухомого складу з урахуванням похибок вимірювального комплексу. Розроблено методу системної інтеграції цих похибок у процес аналізу даних для підвищення точності отриманих результатів. Визначено вплив запропонованого підходу на точність сертифікаційних випробувань та його ефективність у виявленні потенційних експлуатаційних ризиків до введення рухомого складу в експлуатацію. **Результати.** Запропоновано вдосконалений процес сертифікації, що враховує похибки вимірювального комплексу. Дослідження показало, що цей підхід знижує ймовірність пропуску дефектів, які можуть проявитися лише під час експлуатації, тим самим підвищуючи загальну точність сертифікаційних випробувань. **Наукова новизна.** Розроблено метод оцінки надійності даних сертифікаційних випробувань із врахуванням похибок вимірювального комплексу. Доведено, що інтеграція цих даних у процес аналізу результатів випробувань підвищує точність прогнозування експлуатаційної надійності рухомого складу та поліпшує загальну ефективність сертифікаційних випробувань. **Практична значимість.** Запропонований підхід сприяє підвищенню безпеки залізничного транспорту завдяки забезпеченню більш надійного й точного процесу сертифікації нового рухомого складу. Це

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

особливо актуально в контексті модернізації залізничного парку України, зокрема введення в експлуатацію електропоїздів Hyundai Rotem і Tarpan, а також локомотивів Škoda. Удосконалення сертифікаційних випробувань сприяє підвищенню рівня безпеки та ефективності залізничних перевезень.

*Ключові слова:* сертифікаційні випробування; аналіз цифрових сигналів; безпека; завади; електромагнітна сумісність; тяговий струм; гармоніки

## REFERENCE

1. Zhuravlov, A., Sablin, O., Shcheka, V., & Yashchuk, K. (2024). Track circuits interference resistance increase under the traction current influence. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 27, 35-40. DOI: <https://doi.org/10.15802/tsst2024/307339> (in Ukrainian)
2. Pavlenko V. (2021). Certification tests as a tool to improve product quality. *Taurida Scientific Herald. Series: Economics*, 10, 78-83. DOI: <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2021.10.11> (in Ukrainian)
3. Andreas, A. (2018). *Digital Filters: Analysis, Design, and Signal Processing Applications*. Victoria, Canada: McGraw Hill. (in English)
4. Havryliuk, V. I. (2018). Modelling of the Return Traction Current Harmonics Distribution in Rails for AC Electric Railway System. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, 251-254. DOI: <https://doi.org/10.1109/emceurope.2018.8485160> (in English)
5. Hu, H., Liu, Y., Li, Y., He, Z., Gao, S., Zhu, X., & Tao, H. (2024). Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*, 32, 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6> (in English)
6. IEC 62236-1:2018. *Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 1: General*. (2018). Official Edition. Retrieved from <https://webstore.iec.ch/en/publication/62647> (in English)
7. IEC 62236-2:2018. *Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world*. (2018). Retrieved from <https://webstore.iec.ch/en/publication/62648> (in English)
8. IEC 62236-3-1:2018. *Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-1: Rolling stock - Train and complete vehicle*. (2018). Retrieved from <https://webstore.iec.ch/en/publication/62681> (in English)
9. IEC 62236-3-2:2018. *Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-2: Rolling stock – Apparatus*. (2018). Retrieved from <https://webstore.iec.ch/en/publication/62682> (in English)
10. Pous, M., Azpurua, M. A., Oliva, J. A., Aragon, M., Gonzalez, I., & Silva, F. (2018). Full Time Domain EMI Measurement System Applied to Railway Emissions According to IEC 62236-3-1/EN 50121-3-1 Standards. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, 260-265. DOI: <https://doi.org/10.1109/emceurope.2018.8485173> (in English)
11. Salles, R. S., Asplund, R., & Rönnberg, S. K. (2025). Mapping and assessment of harmonic voltage levels for railway traction supply stations in Sweden. *Electric Power Systems Research*, 239, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111195> (in English)

Надійшла до редколегії: 14.02.2025

Прийнята до друку: 20.06.2025

**УДК 656.25:004.421.2**Н. В. МАЛОВІЧКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта n.v.malovichko@ust.edu.ua, ORCID 0009-0004-4093-9212

**Розробка методик пошуку відмов в електричній централізації з використанням орієнтованих дерев**

**Мета.** Ця робота спрямована на зменшення витрат часу на локалізацію відмов у постовій частині електричної централізації релейного типу. **Методика.** Для досягнення поставленої мети було проаналізовано способи пошуку відмов та методи, які застосовують для їх реалізації. З'ясовано, що у зв'язку зі складністю процесу визначення ймовірності відмови для кожного елемента релейної частини системи централізації, методи пошуку відмов, які використовують у наш час, є недосконалими та малоефективними. Запропоновано використовувати алгоритми пошуку відмов у вигляді орієнтованих дерев та розглянуто особливості побудови орієнтованих графів у вигляді дерева. **Результати.** Створено дерево для пошуку відмови в схемі штучного розмикання секцій маршруту і на його прикладі відображено шляхи вдосконалення алгоритмів пошуку за допомогою об'єднання графів для різних відмов у загальне дерево та використання спрощення дерев шляхом поглинання вершин. Також наведено можливості використання алгоритмів Крускала та Прима для визначення оптимальних шляхів пошуку в загальному дереві. Для розв'язання цієї задачі розглянуто можливість використання коду Прюфера під час відображення вузлів та ваги кожного ребра дерева в цифровій формі. **Наукова новизна.** Уперше розроблено методику визначення оптимальних шляхів пошуку відмов у постовій частині електричної централізації з використанням орієнтованих дерев, що дозволяє скоротити час локалізації відмов та обґрунтувати виявлення точок установлення контрольних датчиків для створення автоматизованої системи контролю. **Практичне значення.** Використання запропонованої методики дозволяє визначати оптимальні шляхи пошуку відмов, створювати на базі комп'ютера порадики для прискорення роботи електромеханіки під час пошуку відмови, виявити місця встановлення датчиків контролю в процесі розробки автоматичної системи контролю та фіксувати реальні затрати часу на пошук відмов обслуговувальним персоналом.

*Ключові слова:* алгоритм пошуку відмов; кореневе дерево; граф; зменшення часу затримки поїздів; визначення оптимального шляху; штучне розмикання секцій

**Вступ**

Підвищення рівня безпеки залізничних перевезень згідно з транспортною стратегією України є одним із пріоритетних завдань під час розробки, впровадження та обслуговування систем залізничної автоматики [8]. Ефективність роботи залізничного транспорту в цілому та продуктивність перевезень значною мірою залежать від швидкості обробки рухомого складу на станціях. При цьому ціна кожної затримки поїзда, пов'язаної з відмовою засобів автоматичної централізації, із підвищенням інтенсивності та швидкості руху поїздів із кожним днем буде зростати. Під час побудови та експлуатації нових мікропроцесорних систем централізації на залізничних станціях процес пошуку та усунення відмов значно спрощується, оскільки в системах такого типу вбудовані підсистеми

самоконтролю та діагностування [2]. Мікропроцесорні системи дозволяють навіть контролювати якість технічного обслуговування з боку персоналу та фіксувати затрати часу на цю процедуру [9]. Водночас сьогодні локалізація відмов у релейних системах є доволі складним процесом, який потребує великих затрат часу. Сучасну техніку контролю та діагностування систем із релейною елементною базою реалізують в основному тільки для контролю елементів релейного захисту [7], а розробку комплексів контролю стану елементів системи, яка повністю складається з релейних компонентів, практично не ведуть, оскільки такі системи в наш час уже практично не розробляють. Проте на залізницях України більше ніж 95 % станцій обладнані саме такими системами, і тому розробка методів пошуку відмов у системах, де

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

відсутній автоматичний контроль, є актуальним завданням. Ця робота присвячена розробці методики локалізації відмов у релейних системах централізації шляхом побудови орієнтованих дерев пошуку відмов та особливостям об'єднання окремих дерев пошуку в загальну структуру.

### Мета

Основною метою цієї роботи є зменшення витрат часу на локалізацію відмов у постовій частині електричної централізації релейного типу шляхом розробки методики фіксації відмов із використанням побудови орієнтованих дерев пошуку.

Створення алгоритму дій обслуговувального персоналу під час пошуку відмови у вигляді орієнтованих дерев дозволить значно спростити процес виявлення відмови певного типу, без наявності глибоких знань із принципів роботи електричної централізації з боку працівників. Під час створення окремих дерев пошуку для кожного типу відмови та занесенні їх до загальної бази з'являється можливість їх поєднання в загальну структуру пошуку, що своєю чергою дасть змогу поєднати дерева та створити оптимальний шлях для складних та комбінованих відмов. За умови подальшого накопичення бази пов'язаних дерев є можливість спрощення алгоритмів пошуку за рахунок вилучення несуттєвих та тупикових гілок, а також використання для оптимізації дерев штучних нейронних мереж [4].

### Методика

У системах електричної централізації релейного типу контроль апаратури залежно від моменту фіксації відмови поділяють на два типи. Перший тип контролю виявляє пошкодження в момент їх виникнення. Це такі пошкодження, як втрата контролю крайнього положення стрілки, перекриття сигналів, відмова апаратури рейкових кіл і т. д. Для організації постійного контролю необхідне використання великої кількості апаратури, тому системи централізації контролюють тільки незначну кількість найбільш відповідальних об'єктів. Другий тип контролю виявляє пошкодження в момент використання цих об'єктів для операцій зі

встановлення та відміни маршрутів. Причому понад 90 відсотків усієї постової апаратури контролюють саме таким чином. З цієї причини в разі виникнення відмови в обслуговувального персоналу залишається обмаль часу на виявлення та ліквідацію відмови без створення затримок у поїзній роботі станції.

Для швидкого пошуку елемента, який відмовив у релейній частині електричної централізації, обслуговувальний персонал повинен володіти великим багажем знань та навичок щодо роботи з такими системами, зокрема вміти користуватись вимірювальними приладами, принциповими та монтажними схемами, знати принципи функціонування системи, послідовність роботи окремих елементів та розміщення апаратури в релейній.

У наш час на залізницях України спостерігається значна нестача таких висококваліфікованих працівників, і пошук відмови в разі її виникнення затягується. Також на час пошуку впливає той факт, що в разі виникнення такої проблеми обслуговувальний персонал може бути відсутній на станції, і до часу існування відмови додається час на прослідкування електромеханіка до релейного приміщення цієї станції. З урахуванням усього переліченого і того, що час на пошук місця пошкодження в релейній частині електричної централізації значно більший за час ліквідації відмови після її виявлення, розроблено різні способи ліквідації відмов для пришвидшення цього процесу.

Зокрема, на залізницях України використовують три способи пошуку відмов. Перший спосіб базується на зовнішньому огляді елементів релейної техніки. Він найбільш простий у застосуванні, але водночас не дає можливості виявляти приховані відмови. Другим способом є послідовна заміна компонентів, що передбачає вилучення по черзі елементів, які використовують у колі, що пов'язане з цією відмовою, та заміну їх на працездатні елементи із запасу. Такий спосіб вимагає значних затрат часу для пошуку відмови у великих схемах, наприклад, встановлення маршруту на великих станціях, а оскільки час пошуку відмови є найбільш важливим фактором, який необхідно враховувати, цей спосіб не є ефективним. Крім того, в разі виникнення двох відмов у колі одночасно або за умови виходу з ладу працездатного елемента

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

в момент його встановлення замість непрацездатного цей метод виявити відмову не дозволяє. Третім способом є вимірювання, за допомогою яких визначають пошкоджений елемент. Під час застосування цього способу обслуговувальний персонал користується вимірювальними приладами, а відповідно, також витрачає значний час на пошук та локалізацію відмови.

З урахуванням зазначеного розроблено спеціальні методи пошуку відмов, за яких обслуговувальний персонал може користуватись одним, двома або усіма трьома способами, які дають змогу мінімізувати час локалізації відмови. Найпростіший із них – це метод послідовного перебору елементів. Він ґрунтується на послідовній перевірці всіх елементів кола. Його використання дає найменшу економію часу порівняно з іншими методами, тому зазвичай ним користуються лише в разі недостатньої кваліфікації обслуговувального персоналу.

Другий метод, який використовують на практиці доволі часто – це метод середньої точки за кількістю елементів в електричному колі. Цей метод зазвичай передбачає вимірювання, і перше вимірювання виконують посередині кола, у якому виникла відмова. За допомогою такого вимірювання визначають, у якій половині кола знаходиться елемент, що став непрацездатним. Оскільки в релейній частині електричної централізації через усе коло проходить електричний струм, то вимірювання часто проводять за допомогою вольтметра, і в разі виникнення перехідного опору визначають половину з несправним елементом. Після цього в частині, де зафіксовано несправність, вимірювання знову роблять посередині і повторюють таку процедуру, поки не доходять до елемента, що відмовив. Хоча цей метод і не є найбільш ефективним з точки зору економії часу, але на практиці його використовують найчастіше.

Третім методом пошуку відмов є метод перевірки від середньої точки за ймовірністю відмови елементів. Принцип методу полягає в тому, що під час першого вимірювання коло ділять навпіл не за кількістю елементів, які в нього входять, а за сумарною ймовірністю відмови цих елементів. Такий метод ефективно використовувати саме для релейних схем, оскільки ймовірність відмов елементів різних типів суттєво відрізняється. Метод дає кращу еконо-

мію за часом порівняно з методом середньої точки за кількістю елементів, але потребує від обслуговувального персоналу, крім умінь користуватися схемами та вимірювальними приладами, ще й знань щодо ймовірності відмови того чи іншого елемента. Тому цей метод на практиці використовують нечасто.

Четвертим методом, за допомогою якого виявляють відмови в релейних схемах електричної централізації, є метод інформаційних діаграм. Він базується на комбінації двох попередніх методів, при цьому створюють інформаційну діаграму, у якій прописують алгоритм пошуку відмови обслуговувальним персоналом у вигляді блок-схеми. Залежно від отриманих результатів вимірювань під час пошуку визначають шлях, яким рухається електромеханік для визначення відмови. Такий метод дозволяє отримати оптимальний результат із найменшими затратами часу. Проте побудова інформаційної діаграми є доволі складним процесом, оскільки вимагає досконалих знань щодо ймовірності відмови кожного елемента схеми. На сьогодні інформаційні діаграми розроблені в основному для пошуку відмов у підлогових пристроях, а також у деяких схемах постової частини. Наявні інформаційні діаграми не охоплюють і п'яти відсотків відмов елементів електричної централізації. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки алгоритмів пошуку для всіх можливих відмов постової частини електричної централізації та їх систематизації.

Для оптимізації процесу пошуку відмов у постовій частині електричної централізації розроблено методику формалізації алгоритму дій обслуговувального персоналу у вигляді графів. Як відомо з [5], систему електричної централізації в разі виникнення в ній відмови можна розглядати як систему з невизначеністю. Кожна процедура вимірювань або перевірки якогось з елементів системи цю невизначеність буде зменшувати, оскільки виключають один з елементів бази, знаходження елемента з несправністю стає більш імовірною подією. Таким чином, під час проведення вимірювань ентропія системи зменшується, і досягнення правильного результату залежить від того, яка кількість елементів була в початковій вибірці та скільки елементів уже перевірено.

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Зменшення невизначеності в результаті однієї перевірки можна виразити такою формулою:

$$\Delta H = -P \log_2 P - (1 - P) \log_2 (1 - P),$$

де  $P$  – імовірність виявлення відмови в результаті перевірки.

Із продовженням процедури перевірок, якщо елемент, що відмовив, не визначено, розрахунок ентропії виконують аналогічно, і відбувається процес її зменшення до моменту виявлення відмови. Проведення процедур виявлення ймовірностей відмов для кожного з елементів – доволі складний процес, який можна виконати, спираючись на статистику відмов пристроїв. Але тут також виникає ряд проблем, таких як невідповідність офіційної статистики реальним відмовам на станції, відсутність у статистичних даних розподілення відмов у релейній техніці за кожним з елементів схеми, наявність у статистичних даних відмов причина яких не виявлена, і т. под.

Зважаючи на вищеперелічене, прийнято рішення створювати порядок пошуку відмови у постовій частині системи електричної централізації на підставі експертних оцінок обслуговувального персоналу [14]. Згідно з цим принципом, для кожного типу відмови створюють оптимальний шлях пошуку і представляють це у вигляді графа. Представлення процедури пошуку відмов у вигляді графів зумовлене рядом особливостей цього процесу [10]. По-перше, у процедурі пошуку використовують ряд операцій які є досить різноманітними, таких як візуальний огляд об'єктів та ламп індикації, проведення вимірювань, натискання кнопок на пульті та ін. Задати їх математично та ввести в комп'ютер для аналізу найзручніше саме у вигляді графа. По-друге, у вигляді графів представляють саме дії обслуговувального персоналу під час пошуку відмови, і вони мають послідовну направленість, тобто періодичне повторювання одних і тих самих дій нераціональне, і представлення їх у вигляді орієнтованого графа без циклів є найбільш раціональним.

Під час проведення досліджень виявлено, що найкращі результати обробки та аналізу послідовностей дій персоналу для локалізації від-

мов отримуємо в разі представлення алгоритму у вигляді орієнтованого дерева.

Для пояснення наступних результатів роботи слід відзначити, що дерево – це граф без циклів [12, 13]. Вершину або початок дерева прийнято називати коренем, а дерево, відповідно, кореневим, якщо його направленість йде з однієї вершини. Вершина, яка за структурою дерева знаходиться вище, називається батьківською, а та, яка знаходиться нижче, називається дочірньою. Кожна вершина, окрім кореня, має одну батьківську вершину в дереві, а вершини, які не мають дочірніх, називають листям [11]. Під час побудови кореневих орієнтованих дерев можна на ребрах графа не вказувати направленість, оскільки рух по дереву можливий лише від коренів до листя, але для кращого сприйняття на рисунку направленість відображають.

### Результати

Виконаємо побудову кореневого орієнтованого дерева для пошуку такої відмови, як несправність у схемі штучного розмикання секції в разі відміни маршруту. Для аналізу переваг та недоліків цього методу пошуку відмов можна використати будь-яку відмову в постовій частині системи електричної централізації. Вибір зазначеної відмови пов'язаний із невеликим розміром схеми і, відповідно, доволі скромним орієнтованим деревом, що описує цю процедуру. Під час пошуку відмов у схемах установлення маршруту великих станцій дерево може мати більше сотні вершин, і повний опис його роботи в публікації є досить проблематичним. Структура кореневого дерева пошуку відмови в схемі штучного розмикання маршруту складається з:

$X_1$  – натискають кнопку ИР блока СП секції, яка не розмикається;

$X_2$  – перевірка стану лампи. Лампа ИР блимає;

$X_3$  – перевірка стану лампи. Лампа ИР не світиться;

$X_4$  – необхідна заміна блока СП. Відмова в колі реле РИ;

$X_5$  – натискають кнопку ГИР;

$X_6$  – перевірка стану лампи. Лампа ИР продовжує блимати;

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

$X_7$  – перевірка стану лампи. Лампа ИР горить безперервно;

$X_8$  – перевірка наявності напруги на реле ГРИ1;

$X_9$  – очікування, поки пройде час уповільнення на розмикання секції в блоці витримки;

$X_{10}$  – напруга на обмотці реле ГРИ1 відсутня. Вийшла з ладу кнопка ГИР;

$X_{11}$  – напруга на обмотці реле ГРИ1 наявна. Необхідна заміна реле ГРИ1;

$X_{12}$  – перевірка стану лампи. Лампа ИР продовжує горіти безперервно;

$X_{13}$  – перевірка наявності напруги на реле ИВ;

$X_{14}$  – перевірка стану лампи. Лампа ИР блимає безперервно;

$X_{15}$  – напруга на обмотці реле ИВ відсутня. Вийшов із ладу блок витримки часу;

$X_{16}$  – напруга на обмотці реле ИВ наявна. Необхідна заміна реле ИВ;

$X_{17}$  – необхідна заміна блока СП. Відмова в колі реле Р або реле З (рис. 1).

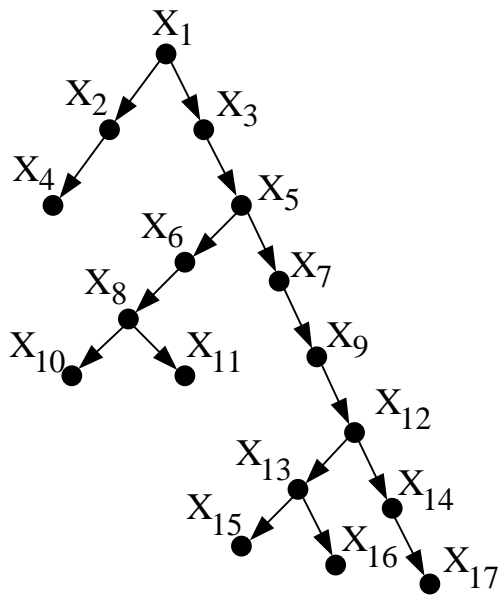


Рис. 1. Кореневе орієнтоване дерево пошуку відмови в схемі штучного розмикання секції маршруту

Fig. 1. Root-oriented fault tree in the artificial route section disconnection scheme

Коренем цього дерева, як і всіх інших дерев, які створюють для пошуку відмови, є перша дія електромеханіка під час початку пошуку, а листям дерева є результати пошуку. Вершини  $X_4$ ,  $X_{10}$ ,  $X_{11}$ ,  $X_{15}$ ,  $X_{16}$ , та  $X_{17}$  є листками, які вказу-

ють на конкретний елемент, що відмовив у схемі. Причому вершини  $X_4$  та  $X_{17}$  вказують на відмову блока СП, але різних його елементів, тому поєднані бути не можуть. Користуючись цим деревом пошуку, електромеханік може виявити типові відмови, які виникають у схемі, навіть без знань про принципи функціонування самої схеми з мінімальними затратами часу.

Наведене дерево наочно відображає процес пошуку відмови, а в разі застосування до нього властивостей направлених графів його можна зменшити. В алгоритмі видалення зайвих вершин направлено графа застосовують принцип: якщо вершина має всього одну дочірню вершину, то її можна видалити і замінити дочірньою [3]. Використавши цю властивість, ми можемо з дерева вилучити вершини  $X_2$ ,  $X_7$ , та  $X_{14}$ , тим самим скоротивши дерево пошуку більше ніж на 10%. Для дерев пошуку більш складних відмов така дія дасть зменшення в десятки вершин.

Під час створення методу пошуку відмов у вигляді орієнтованих дерев необхідно виконати такі кроки для ефективного його застосування. Спочатку необхідно, згідно з думками експертів, що обслуговують такі системи, побудувати орієнтовані дерева для найбільш розповсюджених відмов постової частини електричної централізації. Потім необхідно поєднати ці окремі дерева в загальну структуру, визначивши точки перетину графів та провівши перевірку на ізоморфізм та гомоморфізм [6], перевірити ці дерева на можливість спрощення та визначити остови в загальному дереві для кожного типу відмови. Далі для визначення найкоротшого шляху пошуку відмови можна скористатись алгоритмами Крускала або Прима. Також для автоматизації цих процесів можна назви вершин і дерев представити у вигляді чисел і скористатись кодом Прюфера, який розроблений для розв'язання таких задач [1].

Слід зазначити, що під час побудови дерев пошуку відмов головною характеристикою цього процесу залишається час, який витрачає працівник на локалізацію відмови. Ребра всіх дерев під час створення дерев пошуку вважають однаковими, тобто шлях між вершинами вважають рівнозначним за часом. Таке спрощення використовують з двох причин. По-

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

перше, усі операції пошуку відбуваються в будівлі поста електричної централізації і не мають великих відмінностей за часом переміщення до місця вимірювання чи фіксації стану об'єкта, та й самі типи перевірок зіставні за часом. По-друге, для визначення часу кожної операції необхідно провести експертне опитування за кожним із процесів, що є складною процедурою, і це завдання залишається перспективною майбутніх досліджень.

### Наукова новизна та практична значимість

Уперше розроблено методику визначення оптимальних шляхів пошуку відмов у постовій частині електричної централізації з використанням орієнтованих дерев, що дозволяє скоротити час локалізації відмов та обґрунтувати визначення точок установлення контрольних датчиків для створення автоматизованої системи контролю.

Використання такої методики дозволяє:

- отримати оптимальні шляхи пошуку відмов у постовій частині системи на підставі обробки та мінімізації направлених графів у вигляді дерев за допомогою обчислювальної техніки;

- створити на базі обчислювальної машини, у яку закладені дерева пошуку відмов, програмника для обслуговувального персоналу, за підказками якого електромеханік навіть без знань про принципи функціонування системи зможе локалізувати відмову в найкоротший термін;

- виділити в загальних деревах пошуку відмов вершини, через які найчастіше проходять шляхи пошуку відмов, що відбуваються найбільш регулярно, та встановити в точках системи, які перевіряють ці вершини, датчики контролю. Таким чином, за мінімальних затрат є можливість створити автоматизовану систему пошуку відмов, де контроль головних вершин дерев відбувається автоматично, що дасть змогу розпочинати пошук відмови не від кореня дерева, а від вузлової вершини нижнього рівня, у дочірніх вузлах якої система локалізує відмову. Це дасть змогу зменшити час пошуку для відмов у постовій частині в декілька разів;

- вирішити проблему фіксації реальних затрат часу на пошук відмови, для розрахунку та оплати праці обслуговувального персоналу під час ліквідації пошкоджень. Кожна відмова має свій оптимальний шлях із мінімальною відстанню, рухаючись по якому працівник затратить саме мінімальний час на локалізацію відмови, а оптимальний шлях із часом, необхідним на його проходження, легко отримати з комп'ютера, у якому закладені орієнтовані дерева пошуку.

### Висновки

Використання розробленої методики пошуку відмов у постовій частині електричної централізації на релейній елементній базі за допомогою орієнтованих дерев дозволить суттєво зменшити час на локалізацію відмови і, як наслідок, підвищити пропускну спроможність станцій та зменшити затримки в русі поїздів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрійчук В. І., Комарницький М. Я., Іщук Ю. Б. *Вступ до дискретної математики*. Київ : Центр навчальної літератури, 2004. 254 с.
2. Гаєвський В. В. *Удосконалення технічної експлуатації систем мікропроцесорної централізації на основі оперативної ідентифікації та локалізації порушень* : дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2021. 214 с.
3. Демченко Ф. О., Лістровий С. В., Луханін М. І., Семчук Р. В. *Теорія графів у задачах розподілу ресурсів*. Кн. 1: Алгоритми та методи обчислень. Харків : Нове слово, 2008. 120 с.
4. Добровська Л. М., Добровська І. А. *Теорія та практика нейронних мереж*. Київ : НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2015. 396 с.
5. Жураківський Ю. П., Полторак В. П. *Теорія інформації та кодування*. Київ : Вища школа, 2001. 255 с.
6. Капітонова Ю. В., Кривий С. Л., Летичевський О. А., Луцький Г. М. *Основи дискретної математики*. Київ : Наукова думка, 2002. 580 с.
7. Кутін В. М., Кутіна М. В., Ілюхін М. О. *Засоби діагностування релейного захисту та автоматики електроенергетичних систем*. Вінниця : ВНТУ, 2017. 120 с.
8. *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року*. Київ, 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text>

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

9. Система для визначення якості технічного обслуговування пристроїв залізничної автоматики: пат. № 123221 Україна; заявл. 12.09.2016; опубл. 26.02.2018. Бюл. № 4. 5 с.
10. Тараненко С., Голубева С. Використання «дерева відмов» як логіко-ймовірнісного методу аналізу суднових електродвигунів. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2022. Вип. 40. С. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13>
11. Anderson J. *Discrete Mathematics With Combinatorics*. Prentice Hall, 2003. 928 p.
12. Cui T., Li S. *Space Fault Tree Theory and System Reliability Analysis*. EDP Sciences, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2504-2>
13. Kabir S. An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis. *Expert Systems with Applications*. 2017. Vol. 77. P. 114–135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.01.058>
14. Malovichko V., Rybalka R., Malovichko N., Honcharov K. Determining the Set of Elements for Automatic Monitoring and Diagnosing the Relay Interlocking System. *Proceedings of 26th International Scientific Conference. Transport Means 2022*. (Kaunas, 05–07 Oct. 2022). Kaunas, 2022. Pt. II. P. 509–514.

N. V. MALOVICHKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail n.v.malovichko@ust.edu.ua, ORCID 0009-0004-4093-9212

## Development of a Methodology for Fault Detection in Electrical Centralization Using Oriented Trees

**Purpose.** This work is aimed at reducing the time spent on locating failures in the station part of relay-type electrical centralization. **Methodology.** To achieve this goal, methods for searching for failures and the methods used to implement them were analyzed. It was found that due to the complexity of the process of determining the probability of failure for each element of the relay part of the centralization system, the failure detection methods currently in use are imperfect and ineffective. It is proposed to use failure detection algorithms in the form of directed trees, and the features of constructing directed graphs in the form of a tree are considered. **Finding.** A tree has been created for fault detection in the artificial sectioning of route sections, and its example illustrates ways to improve search algorithms by combining graphs for different faults into a common tree and using tree simplification by absorbing vertices. The possibilities of using Kruskal's and Prim's algorithms to determine the optimal search paths in a common tree are also presented. To solve this problem, the possibility of using Prufer's code when displaying nodes and the weight of each edge of the tree in digital form is considered. **Originality.** For the first time, a methodology has been developed for determining the optimal paths for searching for failures in the post part of electrical centralization using oriented trees, which allows reducing the time for localizing failures and justifying the detection of points for installing control sensors to create an automated control system. **Practical value.** Using the proposed method allows you to determine the optimal paths for finding faults, create a computer-based guide to speed up the work of an electrical engineer when searching for a fault, identify the locations for installing control sensors in the process of developing an automatic control system, and record the actual time spent by maintenance personnel on searching for faults.

**Keywords:** failure search algorithm; root tree; graph; reduction of train delay time; determination of the optimal path; artificial section disconnection

### REFERENCES

1. Andriichuk, V. I., Komarnytskyi, M. Ya., & Ishchuk, Yu. B. (2004). *Vstup do dyskretnoi matematyky*. Kyiv: Tsentr navchalnoi literatury. (in Ukraine)
2. Gaievskiy, V. V. (2021). *Udoskonalennia tekhnichnoi ekspluatatsii system mikroprotsesornoj tsentralizatsii na osnovi operatynoi identyfikatsii ta lokalizatsii porushen* (PhD dissertation). Kharkiv. (in Ukrainian)
3. Demchenko, F. O., Listrovyi, S. V., Lukhanin, M. I., & Semchuk, R. V. (2008). *Theory of graphs in resource allocation problems* (Vol. 1: Algorithms and computational methods). Kharkiv: Nove Slovo. (in Ukraine)
4. Dobrovska, L. M., & Dobrovska, I. A. (2015). *Teoriia ta praktyka neuronnykh mrezh*. Kyiv: NTUU «KPI» Vydavnytstvo «Politekhnik». (in Ukraine)

## АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

5. Zhurakivskiy, Yu. P., & Poltorak, V. P. (2001). *Teoriia informatsii ta koduvannia*. Kyiv: Vyscha shkola. (in Ukraine)
6. Kapitonova, Yu. V., Kryvyi, S. L., Letychevskiy, O. A., & Lutskiy, H. M. (2002). *Osnovy dyskretnoi matematyky*. Kyiv: Naukova dumka. (in Ukraine)
7. Kutin, V. M., Kutina, M. V., & Iliukhin, M. O. (2017). *Zasoby diahnostuvannia releinoho zakhystu ta avtomatyky elektroenerhetychnykh system*. Vinnytsia: VNTU. (in Ukraine)
8. *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku*. (2018). Kyiv. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-r#Text> (in Ukrainian)
9. Moiseienko, V. I., Chehodaiev, B. V., & Kotov, M. O. (2018). *System for determining the quality of maintenance of railway automation devices* (Ukrainian Patent No. 123221). (Ukrpatent). (in Ukrainian)
10. Taranenko, S., & Golubieva, S. (2022). Using the fault tree as a logical-probabilistic method for analysis of ship electric motors. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series "Transport Systems and Technologies,"* 1(40), 149-158. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13> (in Ukraine)
11. Anderson, J. (2003). *Discrete Mathematics With Combinatorics*. Prentice Hall. (in English)
12. Cui, T., & Li, S. (2020). *Space Fault Tree Theory and System Reliability Analysis*. EDP Sciences. DOI: <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2504-2> (in English)
13. Kabir, S. (2017). An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis. *Expert Systems with Applications*, 77, 114-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.01.058> (in English)
14. Malovichko, V., Rybalka, R., Malovichko, N., & Honcharov, K. (2022, Oct.). Determining the Set of Elements for Automatic Monitoring and Diagnosing the Relay Interlocking System. In *Proceedings of 26th International Scientific Conference. Transport Means 2022* (Pt. II, pp. 509-514). Kaunas, Lithuania. (in English)

Надійшла до редколегії: 14.02.2025

Прийнята до друку: 16.06.2025

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

UDC 502.174:[556.3:519.87]

O. A. BUBNOVA<sup>1\*</sup>, V. A. MIROSHNYK<sup>2</sup>, R. V. MARKUL<sup>3</sup>, P. B. MASHYKHINA<sup>4</sup>,  
L. H. TATARKO<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup>M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolska St., 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (099) 654 44 40, e-mail bubnova@nas.gov.ua, ORCID 0000-0001-6064-5204

<sup>2</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 828 64 87, e-mail v.a.miroshnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8115-0128

<sup>3</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail guarangamr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7630-8963

<sup>4</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidro\_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

<sup>5</sup>Dep. «Power Engineering», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI USUCT, Nauky Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail larisa.tatarko@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

### Mathematical Modeling of Filtration and Geomigration Under Conditions of Anthropogenic Load

**Purpose.** The aim of this study is to develop mathematical models for predicting the processes of contamination of the aeration zone and groundwater in the event of leachate leakage from a solid waste landfill. The mathematical models take into account typical hydrological parameters: porosity of the aeration zone, aquifer, filtration coefficient of the aeration zone, filtration coefficient of the underground aquifer, intensity of leachate infiltration into the aeration zone and underground aquifer. **Methodology.** A one-dimensional filtration equation and a one-dimensional mass transfer equation were used to model the process of infiltrate migration in the aeration zone. The modeling of the process of contamination of the underground aquifer, which receives infiltrate from the landfill, was carried out on the basis of a two-dimensional equation (planned model) of geomigration. For the numerical integration of the model equations, a variable-triangular finite-difference splitting scheme was used. The numerical integration of the two-dimensional geomigration equation is performed using the splitting scheme. The peculiarity of the proposed numerical models is that the value of the unknown function can be determined by an explicit formula. **Findings.** Numerical models have been developed to solve the complex problem of predicting the contamination of the aeration zone and underground flow in the case of infiltration of an impurity from a solid waste landfill. **Originality.** Numerical models of filtration and mass transfer of impurities in the case of migration of infiltrate from a municipal solid waste landfill through the aeration zone and into groundwater are proposed. To apply these mathematical models, standard hydrological information is required. The models are aimed at solving complex problems in the field of environmental safety and protection. They make it possible to determine the negative impact of landfills on the environment at the stage of justifying the location of future landfills and their size. **Practical value.** The proposed mathematical models use standard hydrological information, which is important for serial calculations in design organizations, and can be useful for assessing the impact of landfills on environmental pollution.

*Key words:* solid waste landfill; pollution of the aeration zone; groundwater pollution; mathematical model; filtration equation; mass transfer equation

## Introduction

Solid waste landfills are facilities located in all countries of the world (Fig. 1) and are powerful sources of environmental pollution [6, 9].

The amount of waste is increasing over time in countries around the world (Fig. 2), which leads to the need to expand existing landfills and create new ones.



Fig. 1. Waste landfill (<https://cutt.ly/8rsX9C4q>)

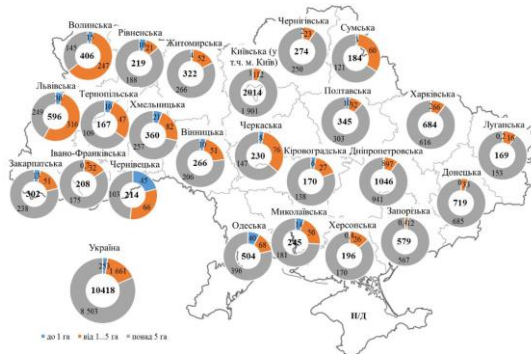


Fig. 2. Annual volumes of household waste disposal at landfills and dumps by regions of Ukraine in 2021, thousand tons [9]

The operation of solid waste landfills causes intense pollution of the air, as well as the aeration zone and groundwater. Precipitation filtering through the landfill «body» leaches out hazardous substances. This leachate contains a significant number of hazardous substances: sulfates, chlorides, nitrates, lead, zinc, cadmium, antimony, organic substances, etc. This leachate is partially discharged through the drainage system (Fig. 3), but despite the protection system, pollutants infiltrate into the aeration zone at almost every landfill. Since the landfills have been in operation for a long time, the pollutants contained in the leachate pass through the aeration zone and groundwater contamination begins.



Fig. 3. Drainage water from the waste landfill

Thus, a contamination zone is formed in the groundwater beneath the landfill, which migrates over time. In addition, it should be borne in mind that groundwater is «unloaded» into water bodies. Thus, the negative impact of landfills will be not only in the contamination of the aeration zone, groundwater, but also surface water.

In this regard, an important problem arises - assessment of the intensity of contamination, primarily of groundwater. It is necessary to have scientifically grounded information on the dynamics of development of contamination areas in groundwater during the landfill operation for a certain period of time, during further landfill development (increase in the size of the storage facility), and also to determine the «reaction» of groundwater to the landfill closure.

Determination of areas of chemical contamination of groundwater is a problem of modeling the processes of filtration and geomigration. To solve problems of this class, analytical and numerical models are most commonly used [1–5, 7, 8, 10, 13]. Analytical models make it possible to obtain an exact solution to the modeling equations. Such solutions are of great importance in scientific research. In addition, analytical solutions of modeling equations can be used to verify other models. Numerical models have a wide operating range and make it possible to obtain solutions to problems that cannot be obtained analytically. In practice, commercial codes are widely used, for example, the MODFLOW software package [11, 12].

## Purpose

To develop a mathematical model for assessing the areas of chemical contamination of groundwater in case of leakage of leachate from a solid waste landfill.

### Methodology

Sketch of the computational region is shown in Fig. 1.



Fig. 4. Sketch of the computational region:  
1 – waste landfill; 2 – aeration zone; 3 – ground waters

The process of filtrate (contaminated liquid) movement in the aeration zone will be modeled by the following equations: the filtration equation (Darcy's law) (1) and the mass transfer equation (2):

$$\mu \frac{dz}{dt} = k \frac{H(t) + z}{z}, \quad (1)$$

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial z} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (2)$$

where  $\mu$  – the lack of saturation;  $z$  – the depth of soil wetting;  $k$  – the filtration coefficient;  $H$  – the level of the neutralizing solution on the ground surface;  $n$  – the active porosity;  $C$  – the concentration of the impurity in the filtered solution;  $\sigma$  – the sorption rate constant;  $u$  – the filtration rate;  $D$  – the dispersion coefficient.

Note that the  $z$ -axis is directed downward from the foot of the landfill in the direction of ground-water flow.

If the aeration zone consists of soil layers of different permeability, the model uses a generalized filtration coefficient determined by the formula of Kamensky G. N.:

$$k = \frac{m}{\sum_i \frac{m_i}{k_i}},$$

where  $m$  – the capacity of the aeration zone;  $m_i$  – the capacity of the  $i$ -th soil layer in the aeration zone with a filtration coefficient  $k_i$ .

For the numerical solution of the 1D mass transfer equation, a difference scheme is used. To develop it, the following transformations are performed:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\Delta t};$$

$$u = u^+ + u^-; u^+ = \frac{u + |u|}{2}; u^- = \frac{u - |u|}{2};$$

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x};$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} = \frac{u_{i+1}^+ C_i - u_i^+ C_{i-1}}{\Delta x} = L_x^+ C;$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} = \frac{u_{i+1}^- C_{i+1} - u_i^- C_i}{\Delta x} = L_x^- C;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} &= \frac{C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}}{\Delta x^2} = \frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta x^2} + \frac{-C_i + C_{i-1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- C + M_{xx}^+ C. \end{aligned}$$

Next, to solve the equation, we split it into two steps:

– first step:

$$\begin{aligned} n \frac{C_i^{n+1/2} - C_i^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1/2} + \frac{\sigma}{2} C^{n+1/2} = \\ = \frac{1}{2} M_{xx}^- C^n + \frac{1}{2} M_{xx}^+ C^{n+1/2}; \end{aligned}$$

– second step:

$$\begin{aligned} n \frac{C_i^{n+1} - C_i^{n+1/2}}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + \frac{\sigma}{2} C^{n+1} = \\ = \frac{1}{2} M_{xx}^- C^{n+1} + \frac{1}{2} M_{xx}^+ C^{n+1/2}. \end{aligned}$$

From these dependencies, the unknown value of the impurity concentration on the upper time layer is found by an explicit running-count formula.

The rate of infiltration is determined as follows (analytical solution by Polubarinova-Kochina P.Y.)

$$u = \frac{k(1-\mu)}{2\mu} + \sqrt{\frac{k^2(1-\mu)^2}{4\mu^2} + \frac{kq}{\mu}}, \quad (3)$$

where  $q$  – the infiltration rate from the landfill.

The modeling of leachate spreading from the landfill in groundwater is based on the following mass transfer equation (equation averaged over the depth of the groundwater flow, planned model):

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q(t) \cdot \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (4)$$

where  $C$  – is the average value of the concentration of a hazardous substance in the groundwater flow;  $u, v$  – are the components of the groundwater flow velocity vector in the projection on the  $x, y$  coordinate axes, respectively;  $x_i, y_i$  – are the Cartesian coordinates of the  $i$ -th source of infiltration of a hazardous substance into the groundwater flow;  $t$  – time;  $\mu_x, \mu_y$  – dispersion coefficients;  $\delta(x_i, y_i)$  – Dirac's delta function, which is used in the model to set the location of the hazardous substance from the landfill into the groundwater flow;  $Q$  – intensity of infiltration of a hazardous substance from the infiltration zone.

For equation (1), the boundary conditions are as following:

1) at  $t = 0$ , the concentration of the impurity in the area of study is set;

2) at the boundary where the flow enters the study area, the condition  $C = C_1$  is set, where  $C_1$  is a known known concentration of an impurity.

3) at the boundary where the flow leaves the study area,  $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$  is set, where  $n$  is a unit vector of the normal to the boundary.

For the numerical integration of equation (4), a rectangular difference grid is used. To build a numerical model, the following physical splitting of the equation is performed:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right).$$

The splitting scheme for the convective transport equation is written as follows:

– at the first step of the splitting, the difference equation is as follows:

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^{k-1}}{\Delta t} + L_x^+ C^k + L_y^+ C^k = 0;$$

– in the second step of the splitting, the difference equation is as follows:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = 0.$$

The unknown value of  $C$  in each equation is determined by the «running account» formula.

For the numerical integration of the diffusion equation, a two-stage difference splitting scheme (A. A. Samarsky's scheme) is used, which has the form:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[ \mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[ \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

The unknown value of  $C$  in each equation is determined by the «running account» formula.

The computer code was created on the basis of the developed numerical model. The programming language is FORTRAN.

To conduct a computational experiment based on the developed computer code, the following data need to be specified:

- 1) the size of the calculation area;
- 2) the location of the landfill;
- 3) step by step;
- 4) values of dispersion coefficients;
- 5) hydrological parameters of the underground flow;
- 6) intensity of infiltrate emission into the groundwater flow;
- 7) capacity of the aeration zone;
- 8) filtration coefficient of aeration zones;
- 9) permeability (for aeration zone and aquifer).

In the computational experiment, the modeling is performed as follows:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

1) calculate the infiltrate migration in the aeration zone for the time step  $\Delta t$ . The intensity of contamination of the aeration zone is determined the boundary of the soaking zone within the aeration zone is determined.

2) determine the time when the infiltrate seeps to the boundary «aeration zone – free groundwater surface». This will be the time when the contamination of the groundwater flow under the landfill begins.

3) Determine the rate of infiltration of the impurity from the landfill into the underground stream.

4) the calculation of the dynamics of the formation of the contamination area in groundwater begins.

### Findings

The developed numerical models were used to solve the modeling problem. The leachate leakage from the landfill was considered and the task was to study the dynamics of the contamination zone formation in the groundwater under the landfill.

The results of the computational experiment are shown in Figs. 5–8. The time and concentration of chlorides in groundwater are shown in a dimensionless form.

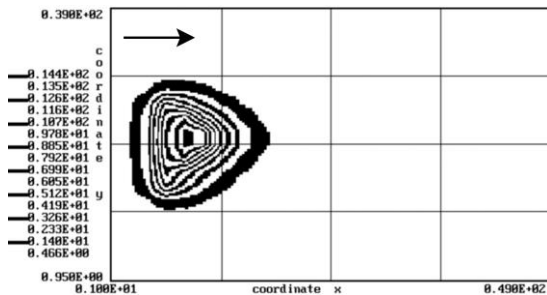


Fig. 5. Contaminated zone in ground waters,  $t = 2.2$

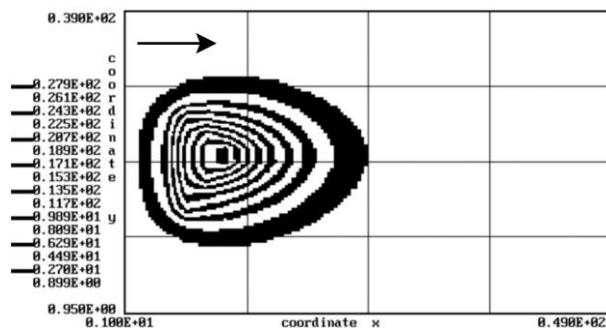


Fig. 6. Contaminated zone in ground waters,  $t = 2.6$

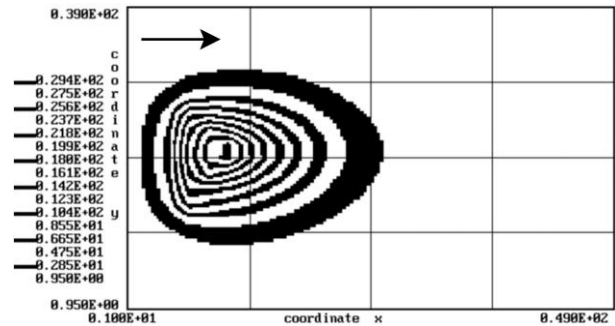


Fig. 7. Contaminated zone in ground waters,  $t = 2.9$

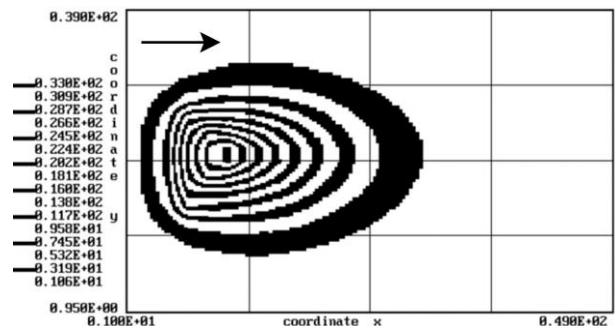


Fig. 8. Contaminated zone in ground waters,  $t = 3.4$

The analysis of the data in Figs. 5–8 shows that over time, the contamination zone increases in size and «stretches» in the direction of groundwater flow. The width of the contamination zone increases due to dispersion.

Worthy of note that computational time was 4 sec.

### Originality and practical value

Numerical models of filtration and mass transfer of impurities during the migration of infiltrate from a solid waste landfill through the aeration zone and into groundwater have been developed.

A special feature of the proposed mathematical models is the use of standard hydrological information. The models are aimed at solving complex problems in the field of environmental safety and protection. The developed models make it possible to determine the negative impact of landfills on the environment at the stage of justifying the location of future landfills and their size.

### Conclusions

1. A mathematical model has been developed to analyze the dynamics of contamination of the aeration zone during the infiltration of an impurity from a solid waste landfill. The modeling is based

on the equations of new-dimensional filtration and mass transfer.

2. A mathematical model for predicting groundwater contamination by infiltrate from a solid waste landfill was developed.

3. The proposed mathematical models use standard hydrological information, which is important for serial calculations in design organizations.

#### LIST OF REFERENCES

1. Біляєв, М. М., Козачина, В. В. Моделювання нестационарного процесу масопереносу в підземних водах. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 2 (106). С. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/305701>
2. Бомба А. Я., Булавацький В. М., Скопечкий В. В. *Нелінійні математичні моделі процесів геогідродинаміки*: монографія. Київ : Наукова думка, 2007. 308 с.
3. Бомба А. Я., Каштан С. С., Пригорницький Д. О., Ярошак С. В. *Методи комплексного аналізу*: монографія. Рівне : НУВГП, 2013. 415 с.
4. Власюк А. П., Остапчук О. П. *Математичне моделювання переносу сольових розчинів при фільтрації підземних вод у ґрунтових масивах*: монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 214 с.
5. Власюк А. П., Остапчук О. П., Шмендрук А. Ю. Чисельне моделювання масопереносу при плановій стаціонарній фільтрації сольових розчинів в двозв'язних кільцевих областях. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: технічні науки*. 2012. Вип. 2 (58). С. 204–211.
6. Орлова Т. О. *Оцінки екологічного стану земельних ділянок, зайнятих відходами та об'єктами поводження з ними* : дис. ... канд. техн. наук. Київ : КНУБА, 2008. 148 с.
7. Пшинько А. Н., Беляєв Н. Н., Калашников И. В. *Эколого-гидрогеологическое обоснование природоохранних мероприятий при ликвидации последствий аварийных разливов*: монографія. Днепропетровск : Нова ідеологія, 2011. 173 с.
8. Рудаков Д. В. *Математичні методи в охороні підземних вод*. Дніпропетровськ : НГУ, 2012. 158 с.
9. Сатін І. В., Куций Д. В. Емісії парникових газів з місць видалення побутових відходів та заходи щодо їх скорочення. *Наукові доповіді національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2024. № 3 (109). С. 1–31. DOI: [https://doi.org/10.31548/dopovidi.3\(109\).2024.003](https://doi.org/10.31548/dopovidi.3(109).2024.003)
10. Bonelli S. Approximate solution to the diffusion equation and its application to seepage-related problems. *Applied Mathematical Modeling*. 2009. Vol. 33. Iss. 1. P. 110–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.10.017>
11. Harbaugh A. W. *MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model--the ground-water flow process*. USA : U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2005. 253 p. DOI: <https://doi.org/10.3133/tm6A16>
12. Koohestani N., Halaghi M. M., Dehghani A. A. Numerical Simulation of Groundwater Level Using MODFLOW Software (a Case Study: Narmab Watershed, Golestan Province). *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*. 2013. Vol. 1. Iss. 8. P. 858–873.
13. Zhangxin C., Yuanle M. *Computational Methods for Multiphase Flows in Porous Media*. USA, Philadelphia : SIAM, 2006. 531 p. DOI: <https://doi.org/10.1137/1.9780898718942>

О. А. БУБНОВА<sup>1\*</sup>, В. А. МІРОШНИК<sup>2</sup>, Р. В. МАРКУЛЬ<sup>3</sup>, П. Б. МАШИХІНА<sup>4</sup>,  
Л. Г. ТАТАРКО<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (099) 654 44 40, ел. пошта [bubnova@nas.gov.ua](mailto:bubnova@nas.gov.ua), ORCID 0000-0001-6064-5204

<sup>2</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, ел. пошта [v.a.miroshnyk@ust.edu.ua](mailto:v.a.miroshnyk@ust.edu.ua), ORCID 0000-0002-8115-0128

<sup>3</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта [guarangamr@gmail.com](mailto:guarangamr@gmail.com), ORCID 0000-0002-7630-8963

<sup>4</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [gidro\\_eko@ukr.net](mailto:gidro_eko@ukr.net), ORCID 0000-0003-3057-9204

<sup>5</sup>Каф. енергетики, Український державний університет науки і технологій, ННІ УДХТУ, пр. Науки, 8, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта [larisa.tatarco@gmail.com](mailto:larisa.tatarco@gmail.com), ORCID 0000-0002-2080-6090

## Математичне моделювання фільтрації та геоміграції в умовах техногенного навантаження

**Мета.** У роботі передбачено розробити математичні моделі для прогнозування процесів забруднення зони аерації та підземних вод у разі витoku фільтрату з полігону твердих побутових відходів. Математичні моделі враховують типові гідрологічні параметри: пористість зони аерації, водоносного горизонту, коефіцієнт фільтрації зони аерації, коефіцієнт фільтрації підземного водоносного горизонту, інтенсивність інфільтрації фільтрату в зону аерації та підземний водоносний горизонт. **Методика.** Для моделювання процесу міграції інфільтрату в зоні аерації використано одновимірне рівняння фільтрації та одновимірне рівняння масопереносу. Моделювання процесу забруднення підземного водоносного горизонту, до якого надходить інфільтрат з полігону, проведено на базі двовимірного рівняння (планова модель) геоміграції. Для чисельного інтегрування рівнянь моделі використано зміннотрикутну скінченнорізницьку схему розщеплення. Чисельне інтегрування двовимірного рівняння геоміграції виконано за схемою розщеплення. Особливістю запропонованих чисельних моделей є те, що значення невідомої функції можна визначити за явною формулою. **Результати.** Розроблено чисельні моделі для розв'язання комплексної задачі прогнозування забруднення зони аерації та підземного потоку в разі інфільтрації домішки з полігону твердих побутових відходів. **Наукова новизна.** Запропоновано чисельні моделі фільтрації та масопереносу домішок у випадку міграції інфільтрату з міського полігону твердих побутових відходів через зону аерації та в підземні води. Для застосування цих математичних моделей потрібно стандартна гідрологічна інформація. Моделі спрямовані на розв'язання комплексних задач у сфері екологічної безпеки та охорони довкілля. Вони дають можливість визначати негативний вплив полігонів ТПВ на навколишнє середовище на етапі обґрунтування місця розташування майбутніх полігонів та їх розмірів. **Практична значимість.** Запропоновані математичні моделі використовують стандартну гідрологічну інформацію, що важливо для серійних розрахунків у проектних організаціях, і можуть бути корисними для оцінки впливу полігонів ТПВ на забруднення навколишнього середовища.

**Ключові слова:** полігон твердих побутових відходів (ТПВ); забруднення зони аерації; забруднення підземних вод; математична модель; рівняння фільтрації; рівняння масопереносу

### REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., & Kozachyna, V. V. (2024). Modeling of Non-Stationary Mass Transfer Process in Groundwater. *Science and Transport Progress*, 2(106), 18-25. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/305701> (in Ukrainian)
2. Bomba, A. Y., Bulavatsky, V. M., & Skopetsky, V. V. (2007). *Neliniini matematychni modeli protsesiv heohidrodynamiky: monohrafiia*. Kyiv: Naukva Dumka. (in Ukrainian)
3. Bomba, A., Kashtan, S., Pryhodnytskyi, D., & Yaroshchak, S. (2013). *Metody kompleksnoho analizu: monohrafiia*. Rivne: NUWEE. (in Ukrainian)
4. Vlasiuk, A. P., & Ostapchuk, O. P. (2015). *Matematychni modeliuvannia perenosu solovykh rozchyniv pry filtratsii pidzemnykh vod u gruntovykh masyvakh: monohrafiia*. Rivne: NUWGP. (in Ukrainian)
5. Vlasiuk, A. P., Ostapchuk, O. P., & Shmendruk, A. Yu. (2012). Chyselne modeliuvannia masoperenosu pry planovii statsionarnii filtratsii solovykh rozchyniv v dvozviaznykh kiltsevykh oblastiakh. *Bulletin of National University of Water and Environmental Engineering*, 2(58), 204-211. (in Ukrainian)
6. Orlova, T. O. (2008). *Otsinky ekolohichnoho stanu zemelnykh dilianok, zainiatykh vidkhodamy ta ob'ektyamy povodzhennia z nymy* (PhD dissertation). Kyiv: KNUCA. (in Ukrainian)
7. Pshinko, A. N., Belyaev, N. N., & Kalashnikov, I. V. (2011). *Ekologo-gidrogeologicheskoe obosnovanie prirod-okhrannykh meropriyatiy pri likvidatsii posledstviy avariynykh razlivov: monografiya*. Dnepropetrovsk: Nova ideolohiia. (in Russian)
8. Rudakov, D. V. (2012). *Matematychni metody v okhroni pidzemnykh vod*. Dnipropetrovsk: National Mining University. (in Ukrainian)
9. Satin, I. V., & Kutsyi, D. V. (2024). Greenhouse gas emissions from municipal waste disposal sites and measures for its reduction. *Naukovi Dopovidi Nacional'nogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannâ Ukraïni*, 109(3), 110-126. DOI: [https://doi.org/10.31548/dopovidi.3\(109\).2024.003](https://doi.org/10.31548/dopovidi.3(109).2024.003) (in Ukrainian)

10. Bonelli, S. (2009). Approximate solution to the diffusion equation and its application to seepage-related problems. *Applied Mathematical Modelling*, 33(1), 110-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.10.017> (in English)
11. Harbaugh, A. W. (2025). *MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model-the ground-water flow process*. USA: U. S. Geological Survey, Reston, Virginia. DOI: <https://doi.org/10.3133/tm6A16> (in English)
12. Koohestani, N., Halaghi, M. M., & Dehghani, A. A. (2013). Numerical Simulation of Groundwater Level Using MODFLOW Software (a Case Study: Narmab Watershed, Golestan Province). *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(8), 858-873. (in English)
13. Zhangxin, C., & Yuanle, M. (2006). *Computational Methods for Multiphase Flows in Porous Media*. USA, Philadelphia: SIAM. DOI: <https://doi.org/10.1137/1.9780898718942> (in English)

Надійшла до редколегії: 12.02.2025

Прийнята до друку: 11.06.2025

## УДК 504.5:628.47

O. O. MEDVEDIEVA<sup>1</sup>, S. V. DZIUBA<sup>2</sup>, M. M. BILIAIEV<sup>3\*</sup>, V. A. KOZACHYNA<sup>4</sup>,  
P. S. KIRICHENKO<sup>5</sup>

<sup>1</sup>M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolska St., 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (098) 506 98 00, e-mail medvedevaolga1702@gmail.com, ORCID 0000-0001-5575-713X

<sup>2</sup>M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolska St., 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (067) 257 50 44, e-mail sergejdzuba@gmail.com, ORCID 0000-0002-3139-2989

<sup>3\*</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>4</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup>Dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation», Kryvyi Rih National University, Vitaly Matusevich St., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, tel. +38 (056) 409 06 06, e-mail pasha\_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

## Forecasting Zones of Air Pollution from Solid Waste Landfills

**Purpose.** The work is aimed at developing a mathematical model that allows to quickly calculate the area of chemical air pollution during the emission of hazardous substances from solid waste landfills. The mathematical model takes into account meteorological parameters, geometric shape of the landfill, intensity of emission of hazardous substances from the landfill. **Methodology.** The two-dimensional equation of convective diffusion transfer of a conservative impurity from the atmosphere is used to analyze the intensity and size of chemical air pollution during the emission of hazardous substances from the landfill. A difference scheme of splitting is used to numerically solve the equation of convective-diffusive transfer of an impurity. The emission of hazardous substances from the landfill is modeled using the Dirac delta function. **Findings.** The developed mathematical model takes into account the main physical factors that affect the process of dispersion of hazardous substances from the landfill. On the basis of the developed numerical model, a computational experiment was conducted to assess the impact of the landfill on the environment. **Originality.** On the basis of the developed numerical model, a computer code was developed that allows predicting chemical pollution of the atmospheric wind and the underlying surface in the event of emission of hazardous substances from the surface of a solid waste landfill. The developed model and computer code make it possible to quickly assess the extent and intensity of environmental pollution from landfills, which is important when selecting sites for new or reconstructed landfills. **Practical value.** The software implementation of the developed numerical model was carried out, and a computational experiment was conducted to illustrate the effectiveness of using the model to solve applied problems related to the impact of landfills on the environment. The results of the numerical experiment are presented.

*Keywords:* solid waste landfill; environmental pollution; forecasting; air pollution; mathematical model

### Introduction

Solid waste landfills are long-term sources of environmental pollution. Almost every country has a significant number of such landfills (Fig. 1).

Therefore, considerable attention is paid to the problem of assessing the impact of solid waste landfills on the environment, the emission of hazardous substances from landfills [2–7, 10] and the problems of reducing the negative impact on the environment [4].

As a rule, landfills occupy a significant area. Over time, hazardous substances infiltration from

the landfill site into the aeration zone occurs and the groundwater beneath the landfill is contaminated.

In addition, very often at these landfills there is a fire of various areas (Fig. 2) and over time quite significant areas of burning garbage can be created (Fig. 3). During the operation of the landfill, burning garbage at landfills releases methane, CO, ammonia and other hazardous substances into the atmospheric air. Thus, significant areas of chemical pollution are formed in the atmosphere in terms of length and intensity, which can cause pollution not only of forests, agricultural lands, but also of air in settlements.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

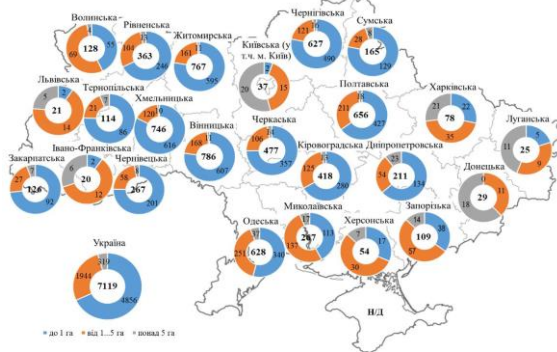


Fig. 1. Number of landfills and landfills by region of Ukraine in 2021 [7]



Fig. 2. Fire centers at the landfill (<https://cutt.ly/6rkLbR1N>)



Fig. 3. Large-scale burning at the landfill (<https://cutt.ly/WrkLbnkt>)

Due to the fact that the sizes of existing landfills increase over time, and new solid waste landfills are also created, an important task arises to predict areas of chemical contamination, the underlying surface when changing the sizes of landfills, during their reconstruction or when creating new landfills.

Determination of areas of chemical pollution of atmospheric air during emission of hazardous substances from solid waste landfills refers to the problem of predicting chemical pollution of at-

mospheric air from a source of technogenic pollution. To solve problems of this class, it is necessary to have special mathematical models that take into account the main physical factors that affect the distribution of chemically hazardous substances in atmospheric air, namely: convective transport of impurities, atmospheric diffusion, intensity of pollutant emission into the air environment, dimensions of the emission source (landfill). To solve problems of this class, the most widely used are the Gaussian model (for example, the commercial code AERMOD) [9, 11], numerical models [1, 8], analytical models. An effective method for solving such problems is the use of CFD models, which allow obtaining almost all the necessary information. However, the use of CFD models requires powerful computers (for example, for commercial codes ANSYS, COMSOL) and a significant amount of time for calculations. In practice, when designing landfills or reconstructing existing landfills, it is necessary to have special, fast-calculating models for the operational assessment of the impact of waste landfills on the environment. The development of such multifactorial and fast-calculating mathematical models («operational models») is a modern trend in the field of ecological safety, environmental protection and labor protection.

### Purpose

Development of a numerical model for assessing areas of chemical pollution of atmospheric air due to the emission of hazardous substances from a solid waste landfill.

### Methodology

In this paper, we will consider an express model for assessing areas of chemical pollution of atmospheric air. Therefore, the prediction of pollution areas is carried out on the basis of a 2D model of air pollution transport (planning model) [1, 2, 8]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (1)$$

where  $S$  – average (by transfer height) value of the concentration of a chemically hazardous substance;  $u$ ,  $v$  – components of the wind speed vector in the

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

projection on the coordinate axis  $x, y$  in accordance;  $x_i, y_i$  – Cartesian, coordinates of the  $i$ -th source of emission of a chemically hazardous substance at the facility;  $t$  – time,  $s$ ;  $\mu_x, \mu_y$  – atmospheric turbulent diffusion coefficients;  $\delta(x_i, y_i)$  – Dirac delta function, which is used to specify the location of the emergency release in the model. The emission intensity of a chemically hazardous substance is equal to  $Q$ .

For equation (1), the following boundary conditions are implemented:

1) at  $t=0$  the impurity concentration in the study area is given;

2) at the boundary where the flow enters the study area, the condition is set  $S=S_I$ , where  $S_I$  – known impurity concentration;

3) at the boundary where the flow exits the study area is given by  $\frac{\partial S}{\partial n} = 0$ , where  $n$  – unit vector normal to the boundary.

For numerical integration of the transfer equation (1), its decomposition is carried out as follows:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x-x_i)(y-y_i). \quad (4)$$

For the numerical solution of equation (2), the following two-step splitting scheme is used:

– the first step uses the dependency:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^n + S_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2}$$

– in the second step, the dependency is used:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- S_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

$$\text{where } u^+ = \frac{u+|u|}{2}, u^- = \frac{u-|u|}{2}.$$

For the numerical solution of equation (3), the following two-step decomposition scheme is used:

– the first step uses the dependency:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^n + S_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2},$$

– in the second step, the dependency is used:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

$$\text{where } v^+ = \frac{v+|v|}{2}, v^- = \frac{v-|v|}{2}.$$

For numerical integration of equation (4) the Euler method is used.

To assess the level of contamination of the underlying surface during the migration of impurities from the landfill, the dependence is used:

$$G = \int_0^T dt \iint_{S, z=0} (w_s + \mu\alpha) C(x, y, z=0, t) ds,$$

where  $t$  – time;  $S$  – surface area;  $\alpha$  – coefficient that takes into account the «capture» of the to-bag;  $T$  – integration period.

When performing calculations, it was assumed  $\alpha = \mu_z$ .

Determining the amount of impurity that has reached the surface of the earth over a certain period of time makes it possible to scientifically determine the level of contamination of the site for calculation purposes to determine the damage.

Based on the developed numerical model, computer code was created. Programming language – FORTRAN.

To conduct a computational experiment based on the developed computer code, you need to specify the following data:

- 1) dimensions of the calculation area;
- 2) landfill location;
- 3) step in time;
- 4) values of atmospheric turbulent diffusion coefficients;
- 5) wind speed and direction;
- 6) intensity of impurity emission into atmospheric air.

When conducting a computational experiment, the following approaches are used:

1. When considering the process of impurity transfer on a scale of 10–15 km, for «pilot» calculations the position of the landfill is modeled as a difference cell where the emission source is located.

2. When considering the process of impurity transfer at a scale of 3–5 km, for «pilot» calculations, the position of the landfill is modeled as a set of difference cells that “cover” the surface of the landfill – the emission source.

### Findings

On the basis of the developed numerical model, the model problem is solved. The location of the probable landfill near the village was considered. It was assumed that the wind speed is 7 m/s. Two scenarios were considered: one landfill near the village and two landfills.

The modeling results are shown in Figs. 4–5.  $CO$  concentration at the landfill was equal to 100 (dimensionless concentration).

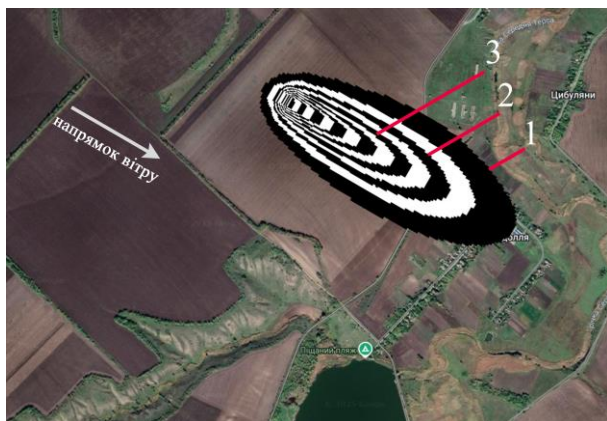


Fig. 4.  $CO$  pollution zone:  
1 –  $C = 11$ ; 2 –  $C = 22$ ;  
3 –  $C = 34$



Fig. 5.  $CO$  pollution zone:  
1 –  $C = 13$ ; 2 –  $C = 22$ ;  
3 –  $C = 34$

As can be seen from the above figures, the landfill will affect the territory of the village. Thus, creation of a polygon will lead to long-term deterioration of air quality in the settlement area. Creation of two polygons will lead to a significant increase in the width of the pollution area.

Calculation time 3 sec.

### Originality and practical value

Based on the developed numerical model, a computer code was developed that allows predicting chemical pollution of atmospheric air and the underlying surface in the event of emission of hazardous substances from the surface of a landfill for solid household waste.

The developed model and computer code make it possible to quickly assess the size and intensity of environmental pollution from landfills, which is important when selecting sites for landfills being created or those that will be reconstructed.

### Conclusions

1. A tool has been created for rapid assessment of atmospheric air pollution due to emissions of hazardous substances from solid waste landfills.

2. The assessment of the level of atmospheric air pollution is carried out on the basis of a fundamental model of continuum mechanics, which allows obtaining scientifically sound forecast results.

3. The developed mathematical model allows for a quick assessment of the level of air pollution, which is important for the practical use of this model.

## LIST OF REFERENCES

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. *CFD-моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях*. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
2. Годовська Т. Б., Фещенко В. П. Критерії індикаторів впливу на агроєкосистеми полігону твердих побутових відходів м. Житомир. *Вісник ЖНАЕУ*. 2011. № 1, т. 1. С. 400–408.
3. *ДБН В.2.4-2-2005 Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування. Зміна № 1 та Зміна № 2* [Чинний від 01.06.2020]. Міністерство розвитку громад та територій України. Київ, 2020. 100 с.
4. Жук Г. В., Предун К. М. Екологічні аспекти використання біогазів полігонів твердих побутових відходів для потреб енергопостачання населених пунктів України. *Вентиляція, освітлення та теплозапобігання*. 2018. Вип. 26. С. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2018.26>
5. Орлова Т. О. *Оцінки екологічного стану земельних ділянок, зайнятих відходами та об'єктами поводження з ними* : дис. ... канд. техн. наук. Київ : КНУБА, 2008. 148 с.
6. Радовенчик В. М., Гомеля М. Д. *Тверді відходи: збір, переробка, складування*. Київ : Кондор, 2010. 550 с.
7. Сатін І. В., Куций Д. В. Емісії парникових газів з місць видалення побутових відходів та заходи щодо їх скорочення. *Наукові доповіді національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2024. № 3 (109). С. 1–31. DOI: [https://doi.org/10.31548/dopovidy.3\(109\).2024.003](https://doi.org/10.31548/dopovidy.3(109).2024.003)
8. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI*. 2011. P. 87–91. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15)
9. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) – APEIRON*. 2018. Vol. 16, No. 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i>
10. Ngusale G., Oloko M., Kabok P., Otiende F., Ngusale G. Estimation of methane and landfill gas emission from an open dump site. *International Journal of Environment and Waste Management*. 2021. Vol. 28. Iss. 3. P. 317–327. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJEW.2021.118368>
11. Trung T. D. B., Tri D. Q. Application of the AERMOD Model to Evaluate the Health Benefits Due to Air Pollution from the Public Transport Sector in Ha Noi, Viet Nam. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2022. № 10. P. 13–33. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2022.103002>

О. О. МЕДВЕДЄВА<sup>1</sup>, С. В. ДЗЮБА<sup>2</sup>, М. М. БІЛЯЄВ<sup>3\*</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>4</sup>,  
П. С. КІРІЧЕНКО<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (098) 506 98 00, ел. пошта [medvedevaolga1702@gmail.com](mailto:medvedevaolga1702@gmail.com), ORCID 0000-0001-5575-713X

<sup>2</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (067) 257 50 44, ел. пошта [sergejdzuba@gmail.com](mailto:sergejdzuba@gmail.com), ORCID 0000-0002-3139-2989

<sup>3\*</sup>Каф. «Гідраліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [biliaiev.m@gmail.com](mailto:biliaiev.m@gmail.com), ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>4</sup>Каф. «Гідраліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта [v.kozachyna@gmail.com](mailto:v.kozachyna@gmail.com), ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup>Каф. «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, ел. пошта [pasha\\_129@ukr.net](mailto:pasha_129@ukr.net), ORCID 0000-0002-0793-9593

## Прогнозування зон забруднення атмосферного повітря від полігонів твердих побутових відходів

**Мета.** Робота спрямована на розробку математичної моделі, яка дозволяє швидко розрахувати зону хімічного забруднення атмосферного повітря в разі емісії небезпечних речовин від полігонів твердих побутових відходів. Математична модель повинна враховувати метеорологічні параметри, геометричну форму поліго-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ну, інтенсивність емісії небезпечних речовин від полігону твердих побутових відходів. **Методика.** Для аналізу інтенсивності та розмірів хімічного забруднення атмосферного повітря в разі емісії небезпечних речовин від полігону використано двовимірне рівняння конвективно-дифузійного переносу консервативної домішки від атмосфери. Чисельне розв'язання рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки виконано за допомогою різницевої схеми розщеплення. Емісію небезпечних речовин від полігону змодельовано з використанням дельта-функції Дірака. **Результати.** Розроблена математична модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання небезпечних речовин від полігону. На основі розробленої чисельної моделі проведено обчислювальний експеримент для оцінки впливу полігону на навколишнє середовище. **Наукова новизна.** На базі запропонованої чисельної моделі розроблено комп'ютерний код, що дозволяє прогнозувати хімічне забруднення атмосферного повітря та підстильної поверхні у випадку емісії небезпечних речовин від поверхні полігону для твердих побутових відходів. Розроблена модель і комп'ютерний код дають можливість швидко оцінювати розміри та інтенсивність забруднення довкілля від полігонів, що важливо під час вибору ділянок під полігони, які створюють, або ті, що будуть реконструйовані. **Практична значимість.** Здійснено програмну реалізацію розробленої чисельної моделі, проведено обчислювальний експеримент, що проілюстрував ефективність використання моделі для розв'язання прикладних задач, які пов'язані з впливом полігонів на навколишнє середовище. Наведено результати чисельного експерименту.

**Ключові слова:** полігон твердих відходів; забруднення навколишнього середовища; прогнозування; забруднення повітря; математична модель

## REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., Berlov, O. V., & Kozachyna, V. A. (2022). *CFD-modeliuvannya v analizi efektyvnosti system zakhystu dovkillia ta pratsivnykiv na robochikh mistsiakh*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Godovska, T., T., & Feshchenko, V. (2011). The criteria of index of influence on agrarian and ecological system of urban ore in the city of Zhytomyr. *Bulletin of ZhNAEU*, 1(1), 400-408. (in Ukrainian)
3. *Polihony tverdykh pobutovykh vidkhodiv. Osnovni polozhennia proektuvannia. Zmina № 1 ta Zmina № 2, 100 DBN V.2.4-2-2005* (2020). (in Ukrainian)
4. Zhuk, H., & Predun, K. (2018). Ecological Aspects of the Biogas Usage from Disposal Sites of Solid Domestic Waste for The Energy Supplyneeds of Ukrainian Residential Areas. *Ventilation, lighting and heat and gas supply*, 26, 69-74. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2018.26> (in Ukrainian)
5. Orlova, T. O. (2008). *Otsinky ekolohichnoho stanu zemelnykh dilianok, zainiatykh vidkhodamy ta ob'ektyamy povodzhennia z nymy* (PhD dissertation). Kyiv: KNUCA. (in Ukrainian)
6. Radovenchuk, V. M., & Homelia, M. D. (2010). *Tverdi vidkhody: zbir, pererobka, skladuvannia*. Kyiv: Kondor. (in Ukrainian)
7. Satin, I. V., & Kutsyi, D. V. (2024). Greenhouse gas emissions from municipal waste disposal sites and measures for its reduction. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 3(109), 1-31. DOI: [https://doi.org/10.31548/dopovidi.3\(109\).2024.003](https://doi.org/10.31548/dopovidi.3(109).2024.003) (in Ukrainian)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and Its Application XXI*, 87-91. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15) (in English)
9. Ilić, P., Ilić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) - APEIRON*, 16(1-2), 38-45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i> (in English)
10. Ngusale, G., Oloko, M., Kabok, P., Otiende, F., & Ngusale, G. (2021). Estimation of methane and landfill gas emission from an open dump site. *International Journal of Environment and Waste Management*, 28(3), 317-327. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJEW.2021.118368> (in English)
11. Trung, T. D. B., Tri, D. Q. (2022). Application of the AERMOD Model to Evaluate the Health Benefits Due to Air Pollution from the Public Transport Sector in Ha Noi, Viet Nam. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10, 13-33. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2022.103002> (in English)

Надійшла до редколегії: 03.02.2025

Прийнята до друку: 09.06.2025

**УДК 629.33:621.355**В. Є. ОЛІШЕВСЬКА<sup>1\*</sup>, Г. С. ОЛІШЕВСЬКИЙ<sup>2\*</sup>, Г. П. ІВАНОВА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. автомобілів та автомобільного господарства, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (099) 36 68 845, ел. пошта olishevskav.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

<sup>2\*</sup> Каф. електроенергетики, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 56 51 830, ел. пошта, olishevskiy.h.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-9576-7527

<sup>3\*</sup> Каф. будівництва, геотехніки та геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 45 29 945, ел. пошта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

**Акумуляторні батареї електромобілів: технічні та екологічні аспекти**

**Мета.** Перспективним напрямом розвитку автомобільного транспорту можна вважати перехід на електромобілі, а одним із ключових елементів, що забезпечує функціонування та визначає перспективи розвитку електромобілів, є акумуляторні батареї. Основна мета роботи – дослідження технічних та екологічних аспектів виробництва, експлуатації та утилізації акумуляторних батарей електромобілів в Україні. **Методика.** Для оцінювання впливу акумуляторних батарей на розвиток електромобілів доцільно дослідити їх виробництво, експлуатацію, виведення з експлуатації (утилізацію). Сьогодні основними проблемами, які пов'язані з акумуляторними батареями електромобілів на етапі виробництва, є: потреба використання критичної сировини; труднощі виробництва високоємнісних та дешевих акумуляторів; поліпшення основних параметрів акумуляторних батарей; забруднення навколишнього середовища. На етапі експлуатації важливими викликами є зміна параметрів акумуляторних батарей і декарбонізація електроенергії, яку використовують під час експлуатації. Виведення акумуляторних батарей з експлуатації є складним завданням, тому що для виробництва компонентів використовують багато різних матеріалів, і для їх переробки на етапі утилізації потрібні різні технології. **Результати.** Проаналізовано сучасний стан, технічні та екологічні аспекти, пов'язані з виробництвом, експлуатацією та утилізацією акумуляторних батарей електромобілів. Показано, що акумуляторні батареї суттєво впливають на собівартість електромобілів, визначають їх характеристики з пробігу та зручності експлуатації, формують екологічний ефект. Акцентовано увагу, що вторинні акумулятори (батареї другого життя) можна використовувати для створення систем зберігання енергії, зарядних станцій для електромобілів та мікромережових енергетичних систем. **Наукова новизна.** Здійснено комплексний аналіз проблем виробництва, експлуатації та переробки акумуляторних батарей, що дозволяє виявити їх вплив на конкурентоспроможність, економічність та екологічність електромобілів. Виділено основні тенденції розвитку акумуляторних батарей електромобілів в Україні. Розглянуто проблеми виготовлення та переробки акумуляторних батарей. Акцентовано увагу, що розвиток інноваційних технологій створення ефективних, безпечних та доступних акумуляторних батарей є важливим кроком до переходу на екологічно чистий транспорт в Україні. **Практична значимість.** Виділено основні тенденції використання акумуляторних батарей електромобілів, які можна розвивати в Україні, розглянуто проблеми їх виготовлення та переробки.

*Ключові слова:* декарбонізація; електромобіль; акумуляторна батарея; технології; матеріали; критична сировина; екологічний вплив

**Вступ**

Однією з найяскравіших характеристик розвитку будь-якої країни є автомобільний транспорт. Роль автомобільного транспорту в сучасному суспільстві дуже велика. В Україні автомобільний транспорт, який належить до критичної інфраструктури, забезпечує більше половини обсягу пасажирських перевезень і три чверті вантажних перевезень [6, 11].

Автомобільний транспорт забезпечує не тільки рух пасажирських і товарно-матеріальних потоків, але й відіграє важливу роль у функціонуванні та розвитку економіки країн.

Сьогодні 99,8 % світового автомобільного транспорту працює на двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) [28]. Але автомобілі з ДВЗ є джерелом викидів в атмосферу шкідливих речовин, що значно погіршують екологічний стан навколишнього середовища, а проблема забруднення

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

набуває особливого значення в умовах урбанізації та стрімкого зростання міського населення [7, 15, 16, 29].

У процентному співвідношенні щодо шкідливих викидів автомобільного транспорту в містах, шкоди навколишньому середовищу і здоров'ю населення завдають: оксиди азоту (44,5 %), акролеїн (7,5 %), сажа (7,4 %), оксид вуглецю (6 %), діоксин сірки (3,4 %), формальдегід (2,8 %), бензапирен (1,3 %) та ацетальдегід (1,1 %) [7].

Забруднення шкідливими викидами повітря посідає четверте місце в містах серед ризиків для здоров'я людини після високого кров'яного тиску, дієт та куріння [3], [7].

Сучасною відповіддю на екологічні проблеми стала глобальна декарбонізація. Ключовим документом у цій сфері є Паризька угода, учасники якої – найбільші економіки світу, зокрема США, Китаю, ЄС. Важливим пунктом Паризької угоди є скорочення викидів за рахунок електрифікації транспорту.

У 2021 р. Європейська комісія (Fit for 55) представила пакет пропозицій у рамках European Green Deal, у якому заплановано скорочення викидів на 55 % до 2030 р. (порівняно з рівнем 1990 року), а до 2050 року – зведення їх до нуля. Про своє прагнення досягти вуглецевої нейтральності до 2050 р. заявили більше ніж 110 країн світу.

Перші електромобілі («Nissan Leaf») з'явилися на ринку у 2010 році, а сьогодні найбільшими ринками електромобілів є США, Японія та Китай, серед європейських країн активно розвивають ринки електромобілів Франція, Нідерланди, Норвегія, Німеччина, Великобританія [4, 29].

Сьогодні електромобілі виготовляє велика кількість компаній, серед яких «Nissan» («Leaf»), «Mitsubishi» («i MiEV»), «Toyota» («RAV4EV»), «Honda» («FitEV»), «Ford» («Focus Electric»), «Tesla» («Roadster», «Model S», «Model X», «Model 3»), «Renault» («Fluence Z.E.», «ZOE», «Kangoo Z.E.», «Twizy»), «BMW» («Active C», «i3»), «Volvo» («C30 Electric»), «Hyundai» («Ioniq Electric»), «General Motors» («Chevrolet Bolt»), «Mahindra» («e2o Plus»), «Volkswagen» («e-Golf»), «Opel» («Ampera-e»), «Mercedes-Benz» («B250e»), «Smart» («ForTwo», «ForTwo cabrio», «ForFour»), «Citroen» («Berlingo Electric»), «Fiat» («500e»), практично всі автовиробники Китаю [4].

Підписання Угоди про асоціацію між Україною та ЄС поставило перед автомобільним транспортом країни завдання екологічно безпечного розвитку та оптимального ресурсного забезпечення [13].

Для реалізації внеску України в рамках Паризької конвенції необхідно впроваджувати інновації та найкращі світові практики в усіх ключових секторах економіки. До 2030 р. в нашій країні передбачено виконання таких завдань:

– скорочення викидів парникових газів до 35 % порівняно з 1990 р.;

– збільшення частки електромобілів до 15 % від усієї кількості автомобілів;

– збільшення частки використання біопалива та розвиток низьковуглецевого транспорту.

Окремою проблемою під час функціонування автомобільного транспорту є утворення великої кількості відходів [10, 23]. Одним із найбільш небезпечних видів відходів автомобільного транспорту є відпрацьовані акумулятори.

Свинцево-кислотні акумулятори, які широко використовують на автомобільному транспорті, містять свинець, сірчану кислоту, ртуть, кадмій, діоксид марганцю, літій та ряд інших шкідливих речовин [10, 14, 23]. Досвід промислово розвинених країн світу показує, що сьогодні можлива майже стовідсоткова переробка свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів [12, 24].

Але перехід автомобільного транспорту на електромобілі викликає необхідність переробки літій-іонних, нікель-кадмієвих, нікель-метал-гідридних та інших акумуляторів електромобілів.

Актуальність проблеми переходу автомобільного транспорту на електромобілі, що потребують для експлуатації електричної енергії, зростає на тлі воєнного стану України, тому що об'єкти транспортної інфраструктури країни стали другим сектором (після житлових будівель), який зазнав найбільших руйнувань, пошкоджень або порушень функціонування [8, 21]. Великих руйнувань та пошкоджень зазнала й енергетична система країни.

Такий стан автомобільного транспорту та економіки країни потребує економії ресурсів і переходу на інноваційні ресурсоощадні технології. Але практична реалізація переходу від традиційних автомобілів із ДВЗ до електромобілів поки що є досить складним процесом, і одним із факторів, що стримує швидкий перехід до електромобілів, є акумуляторні батареї.

### Мета

Основною метою роботи є дослідження технічних та екологічних аспектів виробництва, експлуатації та утилізації акумуляторних батарей електромобілів в Україні.

### Методика

Сьогодні до основних проблем, які пов'язані з акумуляторними батареями електромобілів, можна віднести такі:

- велика вартість електромобілів порівняно з автомобілями з ДВЗ, яка обумовлена високою вартістю акумуляторної батареї;
- порівняно невисокий ресурс акумуляторів електромобілів;
- потреба використання критичної сировини;
- труднощі виробництва високоємнісних і дешевих акумуляторів;
- зміна параметрів акумуляторних батарей;
- зростання кількості електромобілів у нашій країні, у тому числі вживаних електромобілів, що призведе до суттєвого збільшення кількості акумуляторних батарей, які потребують переробки;
- використання в електромобілях різних акумуляторних батарей викликає потребу в різних технологіях переробки, наприклад, літій-іонних, нікель-кадмієвих, нікель-метал-гідридних та інших акумуляторів;
- відсутність у нашій країні ефективної інфраструктури для збору акумуляторних батарей електромобілів;
- потрапляння акумуляторних батарей на звалища, що призводить до втрати ресурсоцінних вторинних матеріалів (літію, нікелю, кадмію та ін.) та значного забруднення навколишнього середовища;
- необхідність створення сучасної інфраструктури для збору та переробки акумуляторів електромобілів;
- недостатня ефективність сучасних технологій переробки акумуляторів електромобілів;
- потреба значних фінансових витрат для переробки акумуляторів електромобілів;
- негативний вплив технології переробки акумуляторів електромобілів на навколишнє середовище;
- необхідність розвитку технології рециклінгу;

– підготовка до повоєнної відбудови, потреба в економії ресурсів та збільшенні раціонального використання вторинних ресурсів, які містяться в акумуляторах електромобілів.

Вирішення цих проблем наразі набуває особливого значення не тільки для створення інноваційного автомобільного транспорту, але і для розвитку економіки країни.

### Результати

*Акумуляторні батареї електромобілів.* Важливим, складним та найбільш дорогим вузлом електромобілів є акумуляторні батареї, які накопичують електричну енергію для живлення двигуна та інших систем транспортного засобу [2, 4, 9].

Розвиток сучасних технологій ставить акумулятори в центр уваги як ключовий елемент, який забезпечує функціонування та визначає перспективи розвитку електромобілів [10].

Сьогодні для електромобілів застосовують різні типи акумуляторних батарей, але найбільш перспективним та поширеним типом акумуляторів для електромобілів є літій-іонні (Li-ion) [1, 2, 4, 9].

Сучасні літій-іонні акумулятори перетворюються, у результаті пошуку найкращого матеріалу для катода, на ціле сімейство хімічних джерел струму, які помітно відрізняються один від одного як енергоємністю, так і параметрами режимів заряду/розряду:

- літій-залізо-фосфатні (LiFePO<sub>4</sub>, LFP);
- літій-марганцеві (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>);
- літій-нікель-марганець-кобальт-оксидні (LiNiMnCoO<sub>2</sub>, NMC);
- літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні (LiNiCoAlO<sub>2</sub>, NCA);
- літій-полімерні (Li-Po);
- літій-титанатні (Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, LTO);
- нікель-кобальт-алюмінієві (NCA) [2, 4, 9].

У літій-іонних акумуляторах як негативний електрод (катод) використовують алюміній, а як позитивний електрод (анод) – мідь [2]. На алюмінієву фольгу наносять катодний матеріал, яким найчастіше виступає літій-залізо-фосфат LiFePO<sub>4</sub>, літій-марганцева шпінель LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> або кобальтат літію LiCoO<sub>2</sub>, на мідну фольгу наносять графіт [2].

Електроди можуть мати різну форму, але, як правило, вони являють собою фольгу у формі циліндра або довгастого пакета [2].

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Перевагами літій-іонних акумуляторів є:

- висока енергетична густина (перевищує технічні характеристики інших типів батарей);
- низький саморозряд;
- відсутність ефекту пам'яті;
- простота обслуговування;
- відносна екологічна безпека [2, 9].

До недоліків літій-іонних акумуляторів належать:

- чутливість до перезарядів і перерозрядів;
- відносно швидке старіння;
- помірний струм розряду;
- висока вартість;
- недосконалість конструкції [2].

Літій-залізо-фосфатні акумуляторні батареї для катодів використовують єдиний безпечний, з точки зору екологічності та небезпеки вибуху,  $\text{LiFePO}_4$  (рис. 1) [2].

Перевагами літій-залізо-фосфатних акумуляторних батарей є підвищений діапазон робочих температур, тривалий термін служби, більш швидка зарядка. Основні недоліки – менша густина заряду, велика чутливість до зберігання за підвищених температур [9].



Рис. 1. Літій-залізо-фосфатний акумулятор

Fig. 1. Lithium iron phosphate battery

Літій-марганцевий акумулятор ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) може забезпечити високий струм розряду, який майже в 30 разів перевищує його ємність. Такий тип батарей використовують в електромобілях «Nissan Leaf» і «BMW i3». До недоліків літій-марганцевих акумуляторів належать невеликий життєвий ресурс і нетерпимість до холоду [9, 30].

Літій-нікель-марганець-кобальт-оксидні акумулятори ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ , NMC) мають непогану питому енергоємність і термін служби до 2000 циклів заряду/розряду, але струм віддачі у них невеликий [30].

Літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні батареї ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ , або NCA) мають високу питому ємність і прийнятну вартість [30].

Літій-полімерні акумуляторні батареї (Li-Po) мають високу енергетичну густина та тривалі цикли заряду/розряду, є менш стабільними та безпечними, ніж  $\text{LiFePO}_4$ . Застосування Li-Po-батарей обмежене через високу чутливість до займання [22, 27, 30].

Літій-титанатні акумулятори ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ , LTO) забезпечують 15 000...20 000 циклів, пожегобезпечні і стійкі до холоду [30].

Літій-титанатні акумуляторні батареї під назвою SCiB (Super Charge Ion Battery) розробляє компанія «Toshiba» [4].

Нікель-метал-гідридні акумуляторні батареї (NiMH) більші за об'ємом та мають меншу енергетичну густина, але більш безпечні та стійкі до перезарядки [22, 27, 30].

Кобальтат літію  $\text{LiCoO}_2$  – отруйний та екологічно шкідливий матеріал [2].

Проведений аналіз показує, що в акумуляторних батареях використовують цінні метали: літій, нікель, марганець, кобальт, алюміній, мідь та ін.

Наступним важливим питанням є з'ясування кількості акумуляторних батарей електромобілів, яку можна дослідити за кількістю електромобілів.

*Аналіз динаміки збільшення кількості електромобілів.* На ринку ЄС електромобілі почали з'являтися у 2010 році, коли частка їх продажу досягла 0,01 % від загального обсягу продажу колісних транспортних засобів. У вересні 2015 року чисельність електромобілів досягла першого мільйона, а у 2016 р. світовий парк електромобілів перевищив 1,2 млн (рис. 1). Але загальний парк електромобілів складав 0,2 % від загального числа легкових автомобілів [18, 29].

У 2016 р. найбільшим ринком електромобілів став Китай, на який припадало понад 40 % електромобілів, проданих у світі. У Норвегії частка продажів електромобілів склала 29 %, у Нідерландах – 6,4 %, у Швеції – 3,4 % [18].

В 2023 р. продажі електромобілів склали: 60 % – у Китаї, 25 % – в ЄС та 10 % – у США [2]. Близько 70 % парку електромобілів, проданих у 2023 р., склали електромобілі на акумуляторних батареях [26].

Динаміка зростання кількості електромобілів показана на рис. 2 [26].

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

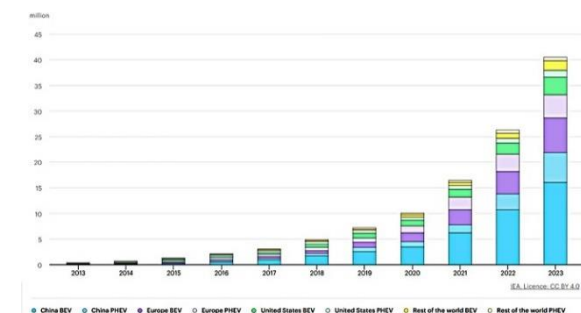


Рис. 2. Динаміка зростання щорічних обсягів продажу електромобілів

Fig. 2. Dynamics of growth in annual sales volumes of electric vehicles

Лідерами з продажів на українському ринку електромобілів за 2020 рік були «Nissan Leaf», «Tesla Model S», «Renault Kangoo», «Tesla Model 3» і «BMW i3» [29]. Електромобілі «Nissan Leaf» і «Tesla Model S» залишалися лідерами в нашій країні й у 2024 році.

Станом на 1 січня 2021 р. в Україні було зареєстровано 25 853 електромобілі, а їх середній вік склав 5 років [29].

Кількість електромобілів у нашій країні постійно збільшується. Станом на 1 вересня 2024 р. в Україні було зареєстровано 119 445 електромобілів, а станом на 1 грудня 2024 р. – 132 157 електромобілів [19]. За кількістю електромобілів Україна сьогодні є лідером серед східноєвропейських країн [19].

За прогнозними оцінками Марини Китіної, кількість електромобілів у нашій країні до 2030 року може зрости до 500 000.

Проведений аналіз показав стійку тенденцію до збільшення кількості електромобілів у світі та Україні зокрема. Наведені дані дають уявлення стосовно кількості акумуляторних батарей електромобілів.

Водночас зі зростанням попиту на акумулятори виникають проблеми, пов'язані з їх виробництвом, експлуатацією та утилізацією [10].

Так, у 2017 році, коли електромобілі склали менше ніж 1 % від загальної кількості автомобілів, на виробництво акумуляторних батарей було витрачено близько 25 % літію, який було видобуто у 2016 р.

Наступне важливе питання пов'язане з високою вартістю нових електромобілів, що призводить до постачання в нашу країну вживаних електромобілів. Наприклад, у 2018 році майже всі

електромобілі, які завозилися в Україну, були вживані, лише один із десяти був новим на момент продажу, а середній вік електромобілів складав більше чотирьох років. У 2024 році кількість завезених в Україну вживаних електромобілів склала 54,1 %.

Тому особливої уваги потребують проблеми накопичення акумуляторних батарей, що вийшли з експлуатації, та їх переробки.

*Виробництво акумуляторних батарей електромобілів.* Сьогодні існує велика кількість виробництв літій-іонних акумуляторів, більшість із яких перебуває в стадії розробки.

Літій-іонні акумулятори для електромобілів виробляють компанії «Panasonic», «Electrolux», «CATL», «LG Chem» і «Samsung SDI» та ін. [9].

На етапі виробництва акумуляторних батарей до основних викликів можна віднести такі:

- потреба використання критичної сировини;
- декарбонізація електроенергії, яку використовують у виробництві акумуляторних батарей;
- декарбонізація матеріалів акумуляторних батарей;
- потреба в розробці нових технологій виробництва акумуляторних батарей;
- зменшення маси акумуляторних батарей шляхом поліпшення компонентів та переходу на нові (легкі) матеріали;
- поліпшення основних параметрів акумуляторних батарей: енергетичної густини, довговічності, коефіцієнта корисної дії (ККД) та ємності;
- зменшення собівартості акумуляторних батарей [27, 30].

Для створення акумуляторних батарей використовують дорогоцінні метали.

Потреба використання критичної сировини – літію, нікелю, кобальту, міді та інших металів – під час виробництва акумуляторних батарей виникає залежно від типу батареї.

У 2023 р. попит на матеріали для акумуляторів становив:

- літій – близько 140 кт, що складало 85 % від загального попиту на літій, приріст більш ніж на 30 % порівняно з 2022 р.;
- кобальт – зростання на 15 % (до 150 кт);
- нікель – майже 370 кт, що на 30 % більше, ніж у 2022 р.

Прогнозують, що до 2030 р. глобальний попит на літій зросте у 12 разів, а на рідкісноземельні елементи – у 5 разів [21].

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Невід’ємним елементом самої стратегії розвитку електромобілів в Україні є виробництво акумуляторних батарей, що вимагає формування і реалізації комплексної програми, державна підтримка якої повинна стати пріоритетною.

В Україні є можливості для видобутку матеріалів та виробництва літій-іонних акумуляторів. Упевненості додає той факт, що на сьогодні розвідані родовища літєвих руд, які не поступаються родовищам США, Канади та Африки. Розвіданими є чотири родовища літію: «Шевченківське» – у Донецькій області, «Полохівське» та «Добра» – у Кіровоградській, «Крута балка» – у Запорізькій [21]. Перспективним також є Беганське родовище (Закарпатська область).

У нашій країні літій присутній у кількості 232 тис. т, що складає 0,4 % всього літію у світі, а за обсягами покладу цього мінералу Україна посідає третє місце у Європі.

Розвиток власної мінерально-сировинної бази літію, який застосовують як основний матеріал у виробництві акумуляторів, надаватиме додаткових перспектив для розвитку ринку електромобілів та, у цілому, економіки України.

Кінцевими продуктами переробки можуть бути:

- літєвмісна руда;
- збагачена руда залежно від вилучення з відповідною концентрацією (сподумен – 4...6 % оксиду літію, петаліт – до 4 % оксиду літію);
- виробництво карбонату літію;
- виробництво катодів та анодів;
- виробництво літій-іонних батарей.

Видобуток критичної сировини та виробництво акумуляторних батарей для електромобілів відповідають стратегічним напрямкам розвитку економіки країни.

У пріоритеті розвитку реального сектора в умовах війни та повоєнного відновлення економіки України визначена розробка Програми підтримки розвитку електротранспорту в Україні, у якій передбачено створення привабливих умов для локалізації виробництва на території України електромобілів, подовження ланцюга доданої вартості з переробки сировини через випуск акумуляторних батарей, потужностей із переробки та утилізації відпрацьованих літій-іонних акумуляторів [21].

Для поліпшення основних параметрів акумуляторних батарей проводять дослідження з вибору та обґрунтування матеріалів і форм анодів

та катодів, вибору електролітів – рідина, тверде тіло.

Як приклад візьмемо електромобілі «Nissan Leaf» та «Tesla Model S», які були лідерами продаж у нашій країні протягом багатьох років і залишилися лідерами у 2024 році.

Удосконалення структури елементів живлення «Nissan Leaf» в 2017 році (24 блоки по 8 пакетних полімерних елементів живлення за тієї ж загальної кількості елементів живлення 192 шт., як і в попередньому варіанті) дозволило підвищити запас ходу електромобіля на 67 % (рис. 3) [2].

*a – a*



*б – б*



Рис. 3. Приклад пакетного полімерного елемента живлення та його розподілу в акумуляторній батареї «Nissan Leaf»:

*a* – пакетний полімерний елемент живлення «Nissan Leaf»;  
*б* – акумуляторна батарея

Fig. 3. Example of a packaged polymer battery and its distribution in a «Nissan Leaf» battery:

*a* – packaged polymer battery «Nissan Leaf»;  
*b* – battery

Приклад елемента живлення 18650 та його розподілу в акумуляторній батареї електромобіля «Tesla Model S» показано на рис. 4 [1, 2].

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

*a – a**б – б*

Рис. 4. Приклад елементів живлення 18650 та їхнього розподілу в акумуляторній батареї:  
*a* – приклад елементів живлення зразка 18650 (18 x 65 мм); *б* – акумуляторна батарея «Tesla Model S»

Fig. 4. Example of 18650 cells and their distribution in a battery pack:  
*a* – example of 18650 sample cells (18 x 65 mm);  
*b* – «Tesla Model S» battery pack

Компанія «Honda» розробляє твердоелектролітні батареї, які до 2030 р. забезпечать проїзд до 1 000 км на одному заряді, а після 2040 р. – до 1 250 км [22]. Прогнозують, що, порівняно із сучасними літій-іонними акумуляторами, твердоелектролітні батареї електромобілів будуть мати менший розмір на 50 %, меншу вагу – на 35 % та меншу ціну – на 25 %.

Над технологіями створення твердих електролітів працюють багато компанії, зокрема «Toyota», «Nissan», «Stellantis», «BMW», «Volkswagen» та ін. [22].

Новим напрямом розробок акумуляторних батарей електромобілів є наноматеріали. Для виробництва літій-залізо-фосфатного акумулятора частинки з літій-залізо-фосфату було зроблено пластинчастої форми і покрито шаром нановуглецю [2].

Модифікування нанопокриттів надає можливості для створення акумуляторів із часом зарядження до 3 хвилин, терміном експлуатації акумулятора до 10 років [2].

Широкі можливості надають полімерні електроліти, які мають у своєму складі солі літію і завдяки своїй пластичності дозволяють виготовляти літій-іонні акумулятори різної форми з великою внутрішньою поверхнею, що значно підвищує технологічні можливості виробництва акумуляторних батарей [2].

Перспективними напрямками розвитку акумуляторних технологій є:

- поліпшення катодних і анодних матеріалів для підвищення густини енергії;
- розробка стабільних і довговічних твердотільних електролітів;
- використання альтернативних хімічних складів, таких як натрій-іонні та магній-іонні акумулятори;
- оптимізація процесів виробництва для зниження вартості акумуляторів;
- упровадження нових методів управління температурою і безпекою акумуляторів;
- поліпшення основних параметрів акумуляторних батарей: енергетичної густини, довговічності, ККД та ємності.

Слід звернути увагу, що на сучасному рівні розвитку науки розробка електромобілів зі збільшеним запасом ходу залишається складним завданням [20].

Ще одним важливим викликом, який суттєво впливає на вартість нового електромобіля, є вартість акумуляторів, яка значно варіюється залежно від типу транспортного засобу та батареї [9].

Висока вартість акумуляторної батареї не тільки збільшує вартість електромобіля, але й значно зменшує його конкурентоспроможність порівняно з автомобілем із ДВЗ. Наприклад, у 2010 р. модель «Nissan Leaf», у якій вартість акумуляторної батареї складала 57,3 % від вартості електромобіля, продавали зі збитком.

Але завдяки прогресу в технології акумуляторів електромобілі показують значно кращі технічні характеристики, наприклад, збільшення густини енергії, а також швидке зниження вартості батарей [31].

На рис. 5 показано динаміку цін матеріалів для акумуляторів і літій-іонних акумуляторів протягом 2015...2024 рр. [26].

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Зниження цін на літій-іонні акумулятори на 74 %, що відбувалося з 2011 по 2017 р., призвело до збільшення кількості продажів електромобілів у світі в 16 разів.

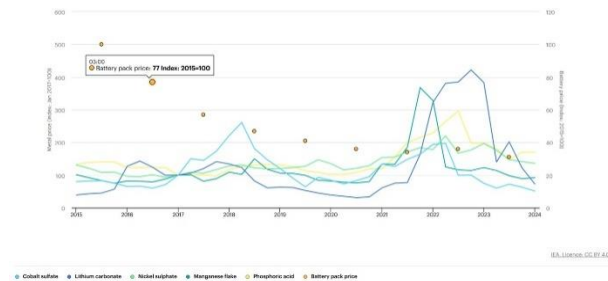


Рис. 5. Ціна окремих матеріалів для акумуляторів і літій-іонних акумуляторів протягом 2015...2024 рр.

Fig. 5. Price of selected battery materials and lithium-ion batteries during 2015...2024

На рис. 6 показано тенденції зменшення вартості акумуляторних батарей та прогноз до 2035 року [18]. Удосконалення технологій виробництва батарей призводить до скорочення розриву між цінами на електромобілі та автомобілі з ДВЗ, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності та збільшенню кількості продажів електромобілів [18].

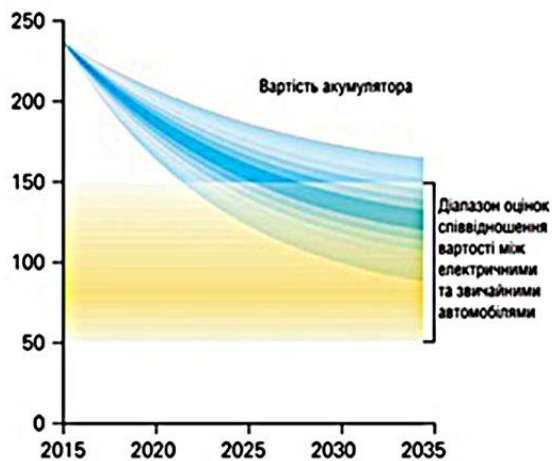


Рис. 6. Прогноз зміни вартості акумуляторної батареї до 2035 року, \$/кВт-год

Fig. 6. Forecast of battery cost changes until 2035, \$/kWh

Більшість сучасних технологій видобутку критичної сировини та виробництва акумуляторів потребують багато ресурсів та можуть нега-

тивно впливати на навколишнє середовище (повітря, воду, ґрунт). Щоб автомобільний транспорт став справді екологічним, на етапах видобутку критичної сировини та виробництва акумуляторних батарей для електромобілів потрібно впроваджувати інноваційні технології та зменшувати екологічне навантаження на навколишнє середовище.

*Експлуатація акумуляторних батарей електромобілів.* На цьому етапі основними факторами є:

- зміна параметрів акумуляторних батарей;
- декарбонізація електроенергії, яку використовують під час експлуатації;
- створення інфраструктури;
- поліпшення ефективності електродвигуна;
- контроль, обслуговування та ремонт акумуляторних батарей;
- аварійне пошкодження акумуляторних батарей у ДТП.

Під час експлуатації важливим є збереження основних параметрів акумуляторних батарей електромобілів: енергетичної густини, довговічності, коефіцієнта ККД та ємності [4].

Розповсюдження набули літій-іонні акумуляторні батареї, у яких у процесі експлуатації відбуваються зміни характеристик: величини внутрішнього опору та опору поляризації; величини ємності; деградація акумуляторних батарей [20].

Під час експлуатації літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля знижується її ємність, що відбувається як у разі збільшення циклічного заряду, так і в режимі простою. Зниження ємності батареї призводить до зниження дальності пробігу на одному заряді [20].

Втрата ємності з часом впливає на споживання енергії електромобілем та механізм старіння акумуляторної батареї.

Деградація акумуляторних батарей електромобілів, яка відбувається через хімічні побічні реакції під час зберігання та електрохімічні побічні реакції під час роботи, залежить головним чином від температури, величини розряду, системи охолодження та швидкості заряду [20, 25]. Середня річна швидкість деградації акумуляторних батарей електромобілів становить близько 2,3 % [20, 25].

Перехід на електромобілі дозволить зменшити забруднення навколишнього середовища автомобільного транспорту [17]. У повітря не

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

потраплятимуть токсичні речовини (канцерогени), CO, озон, леткі органічні сполуки; вважають, що рівень CO<sub>2</sub> може бути знижений удвічі, вміст окислів азоту NO<sub>x</sub> може бути зменшений на 20...25 % [17].

Існує гіпотеза, що в разі масової експлуатації електромобілів знизиться забруднення навколишнього середовища в містах, але погіршиться екологічна ситуація в місцях виробництва електроенергії та загалом на планеті [17].

Вміст двоокису сірки, який є продуктом спалювання вугілля на теплових електростанціях та викликає кислотні дощі, зросте [17].

Потрібно звернути увагу, що екологічні характеристики акумуляторних електромобілів залежать від розміру акумулятора та джерела зарядної електрики.

У рамках Паризької конвенції в Україні до 2030 р. в галузі електроенергетики передбачені такі завдання:

- збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) до 30 % (на кінець 2019 р. частка ВДЕ становила 10,9 % від загальної кількості виробленої електроенергії);
- зменшення кількості вугільних ТЕС;
- поступове закриття вугільних шахт у комплексі з програмами трансформації вугільних регіонів.

Упровадження в електроенергетиці інноваційних технологій дозволить забезпечити перехід на електромобілі та поліпшити екологічну ситуацію в країні.

Сучасним підходом до оцінювання екологічності електромобіля є оцінка викидів «well-to-wheel», що включає викиди парникових газів, енергоефективність та виробничі витрати. Згідно з оцінкою викидів «well-to-wheel», викиди за рік від електромобіля удвічі менші, ніж від автомобіля з бензиновим ДВЗ [4]. Але в розрахунках кількості викидів «well-to-wheel» потрібно враховувати, що вони залежать від способу виробництва електроенергії [4].

Під час експлуатації електромобілів слід звертати увагу на такий важливий аспект: у випадку сильного нагрівання літій-іонних акумуляторних батарей може статися займання та виділення шкідливих газів [9]. Пожежі на електромобілях, серйозною причиною яких є тепловий розгін (ТР) автомобільних акумуляторних батарей, стають усе більш частішими. ТР означає, що елементи тягової акумуляторної батареї

вступають у процес неконтрольованого виділення тепла і швидкого підвищення температури [2].

Експлуатація акумуляторних батарей вимагає суворого дотримання правил техніки безпеки.

Ураховуючи досвід експлуатації електромобілів, рятувальники по всьому світу вже розробляють методику гасіння електромобілів та їх розтину після ДТП [2].

Вважають, що етап експлуатації акумуляторних батарей електромобілів завершується в разі досягнення 75...80 % номінальної ємності [30].

Особливістю українського ринку є досить висока частка тих електромобілів, які вже були у використанні, що не тільки зменшує екологічний ефект, але й несе ризик, насамперед швидкого вичерпання ресурсу високовартісних акумуляторів та створення великої кількості акумуляторних відходів.

*Утилізація акумуляторних батарей електромобілів.* З акумуляторними батареями електромобілів пов'язане ще одне питання, яке, з огляду на відносну новизну світового ринку електромобілів, виходить на перший план – це питання утилізації акумуляторних батарей.

Термін служби акумуляторів оцінюють на рівні п'яти-восьми років, після чого вони вимагають заміни.

Моделі масових електромобілів першого покоління, наприклад, «Nissan Leaf», вже сьогодні потребують заміни акумуляторних батарей. Збільшення кількості «відпрацьованих» для свого первісного призначення акумуляторних батарей буде зростати.

Основними факторами на етапі виведення з експлуатації (утилізації) акумуляторних батарей є:

- потреба створення сучасної інфраструктури для збору та переробки акумуляторів електромобілів;
- декарбонізація електроенергії, яку використовують у процесах переробки;
- удосконалення наявних технологій переробки акумуляторних батарей;
- розробка нових технологій переробки акумуляторних батарей;
- використання акумуляторних батарей протягом другого терміну служби;

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– підготовка до повосної відбудови, потреба економії ресурсів і збільшення раціонального використання ресурсів, які містяться у відпрацьованих акумуляторах електромобілів.

В акумуляторних батареях містяться літій, нікель, кобальт, мідь та інші метали залежно від типу батареї. Отримання цих металів від переробки акумуляторних батарей значно простіше та дешевше, ніж їх видобуток [4].

Основним завданням утилізації акумуляторних батарей є зменшення ресурсів, які витрачають на виготовлення нових батарей.

Переробка акумуляторних літій-іонних батарей є складним завданням, тому що для виробництва компонентів використовують багато різних матеріалів, і для їх переробки на етапі утилізації потрібні різні технології.

Наразі використовують різні технології переробки відпрацьованих літій-іонних батарей: пірометалургійну та гідрометалургійну технології, біометалургію або їх комбінації.

Пірометалургія – це процес вилучення металів або металевих сполук із відпрацьованих акумуляторів безпосередньо за допомогою високих температур, який включає піроліз, спалювання, випал, плавку та рідке вилуговування [5].

Гідрометалургійний процес складніший за пірометалургійний, але має більш високу віддачу, м'які умови експлуатації та менше забруднення навколишнього середовища [5].

Процес біометалургії використовує мікроорганізми (бактерії) для обробки та відновлення металів [5].

Сучасні технології переробки потребують великої кількості енергії та мають шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Вторинні акумулятори (батареї другого життя) можна використовувати для створення систем зберігання енергії, зарядних станцій для електромобілів та мікромережових енергетичних систем [30].

### Наукова новизна та практична значимість

Проведено комплексний аналіз проблем виробництва, експлуатації та переробки акумуляторних батарей, що дозволяє виявити їх вплив на конкурентоспроможність, економічність та екологічність електромобілів.

Виділено основні тенденції акумуляторних батарей електромобілів, які можна розвивати в Україні; розглянуто проблеми виготовлення та переробки акумуляторних батарей.

Переробка відпрацьованих акумуляторних батарей сприяє збереженню природних ресурсів, тому що батареї є джерелом цінних матеріалів, що своєю чергою, дозволяє знижувати залежність від видобутку сировини та зменшує виснаження природних ресурсів країни.

Переробка відпрацьованих акумуляторних батарей має велике значення для досягнення нульових показників викидів вуглецю від автомобільного транспорту.

Акцентовано увагу, що розвиток інноваційних технологій створення ефективних, безпечних та доступних акумуляторних батарей є важливим кроком до переходу на екологічно чистий транспорт у країні.

### Висновки

Перспективним напрямом вирішення складних проблем автомобільного транспорту в умовах економічної кризи, дефіциту енергоресурсів та інтенсивного забруднення навколишнього середовища може бути розвиток електромобілів.

Враховуючи актуальні тенденції електрифікації автомобільного транспорту, більшість великих автовиробників декларують відмову від випуску автомобілів із ДВЗ, як вантажних, так і легкових, протягом найближчих 10...15 років і щотижня анонсують нові моделі електромобілів.

Одним із факторів, що стримує швидкий перехід на електромобілі, є акумуляторні батареї, для виробництва яких потрібні дорогі метали (наприклад, літій, нікель, кобальт та ін.), що надає високої вартості електромобілям порівняно зі звичайними автомобілями з ДВЗ.

У роботі проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку акумуляторних батарей електромобілів, розглянуто питання, пов'язані з їх виробництвом, експлуатацією та утилізацією.

Для електромобілів застосовують різні типи акумуляторних батарей, найбільш перспективним та поширеним серед яких є літій-іонні акумулятори – сімейство батарей з різними складами електрохімічних елементів.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Виробництво акумуляторних батарей супроводжується значними екологічними викликами. Процес видобутку сировини для акумуляторів (літію, кобальту, нікелю та ін.) має серйозні наслідки для навколишнього середовища.

Показано, що акумуляторні батареї суттєво впливають на собівартість електромобілів, визначають їх характеристики з пробігу та зручності експлуатації, формують екологічний ефект.

На етапі експлуатації електромобілів акумуляторні батареї забезпечують екологічність (немає шкідливих викидів в атмосферу), економічність (використання електроенергії більш дешево, ніж використання бензинів або дизельного палива) та безшумність.

Інтенсивний розвиток електромобілів призводить до зростання кількості акумуляторних батарей, що потребують утилізації.

Сьогодні зростає важливість використання вторинних продуктів. Удосконалення наявних та розробка нових технологій переробки акумуляторних батарей дозволить зменшити використання дорогих критичних ресурсів, які витрачаються на виготовлення нових батарей.

Утилізація акумуляторних батарей електромобілів є окремою проблемою, тому що акумулятори містять токсичні компоненти, і в разі порушення правил утилізації вони можуть забруднювати навколишнє середовище.

Переробка акумуляторного брухту електромобілів дозволяє вирішувати дві важливі та актуальні проблеми: отримання цінної вторинної сировини (літію, нікелю, марганцю, кобальту, алюмінію, міді та ін.) та охорони навколишнього середовища від забруднення.

За відсутності необхідної інфраструктури та

обмеженого охоплення, відпрацьовані акумулятори електромобілів можуть потрапляти на звалища, що буде призводити до забруднення навколишнього середовища та втрат цінних вторинних ресурсів.

Акцентовано увагу, що вторинні акумулятори (батареї другого життя) можна використовувати для створення систем зберігання енергії, зарядних станцій для електромобілів та мікромережевих енергетичних систем.

Розвиток автомобільного транспорту з нульовими викидами стримують такі виклики:

- труднощі виробництва високоємнісних і дешевих акумуляторних батарей;
- велика вартість електромобілів порівняно з традиційними автомобілями з ДВЗ, яка обумовлена високою вартістю батарей;
- порівняно невисокий ресурс акумуляторів електромобілів;
- проблеми утилізації акумуляторів, оскільки вони містять отруйні речовини.

Урахування екологічного фактора є необхідною умовою інтеграції української економіки у світові економічні процеси з метою забезпечення її конкурентоспроможності.

Пріоритетними напрямками розвитку в умовах повоєнного відновлення економіки України є створення привабливих умов для:

- локалізації виробництва на території України електромобілів;
- подовження ланцюга доданої вартості переробки сировини через випуск акумуляторних батарей;
- розвитку потужностей із переробки та утилізації відпрацьованих літій-іонних акумуляторів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Багач Р. В. Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2023. № 24. С. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2023.24.0.2>
2. Бажинов О. В., Кравцов М. М. *Небезпека транспортних засобів*: монографія. Харків : ЧП Стариченко Л. А., 2022. 160 с.
3. Викиди від транспорту і як з ними боротися. *Федерація роботодавців автомобільної галузі*. URL: <https://fra.org.ua/uk/an/publikatsii/analitika/vikidi-vid-transportu-i-iak-z-nimi-borotisja>
4. Гнатов А. В. *Будова гібридних автомобілів і електромобілів*: конспект лекцій з дисципліни. Харків : ХНАДУ, 2021. 72 с.
5. Голуб М. Ю. *Удосконалення системи поводження з відпрацьованими літій-іонними акумуляторами для електромобілів*: бакалаврська дипломна робота. Дніпро, 2024. 65 с.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

6. Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури. Кабінет Міністрів України, 2020.  
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text>
7. Запорожець О. І., Бойченко С. В., Матвєєва О. Л., Шаманський С. Й., Дмитруха Т. І., Маджд С. М. *Транспортна екологія*. Київ : НАУ, 2017. 507 с.
8. Іванова Г. П., Олішевська В. Є., Гапєєв С. М., Олішевська С. О. Будівельна галузь України: трансформації та перспективи в умовах воєнного стану та повоєнної відбудови. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 4 (108). С. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/317405>
9. Кушка М. М., Криворот А. І. Огляд акумуляторних батарей електромобілів. *Тези 76-ї наук. конф. викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»* (Полтава, 14 трав.-23 трав. 2024 р.). Полтава : Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2024. Т. 1. С. 268–270.
10. Лахтадир С. Екологічні аспекти виробництва та утилізації акумуляторів. *Наука і техніка сьогодні*. 2024. № 13 (41). С. 1110–1119. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13\(41\)-1110-1119](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-1110-1119)
11. Линник І. Е., Лежнева О. І., Дорожко С. В., Вакуленко К. Є., Соколова Н. А., Афанасьєва І. А. *Екологічні аспекти автотранспортного комплексу*: монографія. Харків : Видавництво «Смуґаста типографія», 2020. 194 с.
12. Нефедов В. Г., Поліщук Ю. В. *Електрохімічна енергетика. Свинцеві акумулятори: улаштування, виробництво, розрахунки*. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2013. 298 с.
13. Никифорок О. І., Чукаєва І. К., Піріашвілі Б. З., Ляшенко О. Ф., Карпов В. М., Кудрицька Н. В. ... Плюта І. Ю. *Розвиток інфраструктурних секторів як чинник реалізації пріоритетних напрямів економічної політики України*: колективна монографія. Національна академія наук України, ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України». Київ, 2017. 522 с.
14. Олішевська В. Є., Іванова Г. П., Олішевський Г. С. Переробка свинцево-кислотних акумуляторів автомобілів: виклики та перспективи. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 1 (109). С. 142–151. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/325342>
15. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С. Екологічний вплив автомобільного транспорту на навколишнє середовище. *Інноваційні технології підготовки кадрів для промисловості та транспорту 2023: зб. наук. праць міжнар. конф.* (Дніпро, 28-29 квіт. 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 147–152.
16. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С. Обґрунтування раціонального рухомого складу підприємства в умовах переходу до електромобілів. *Автошляховик України*. 2024. № 2. С. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-35-44>
17. Пиндус Ю. І., Заверуха Р. Р. *Електронне та мікропроцесорне обладнання автомобілів*: навчальний посібник. Тернопіль : ТНТУ, 2016. 209 с.
18. *Роль і місце української енергетики у світових енергетичних процесах*. Київ, 2018. 90 с.  
URL: [https://razumkov.org.ua/uploads/article/2018\\_ENERGY\\_PRINT.pdf](https://razumkov.org.ua/uploads/article/2018_ENERGY_PRINT.pdf)
19. *Серпень став рекордним місяцем для електромобільності в Україні*. IONITY. 2024.  
URL: <https://ionity.ua/news/serpen-stav-rekordnym-misyaczem-dlya-elektromobilnosti-v-ukrayini/>
20. Смирнов О. П., Борисенко А. О. Порівняльний аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2023. № 24. С. 50–61. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2023.24.05>
21. Собкевич О. В., Шевченко А. В., Русан В. М., Белашов Є. В., Жураковська Л. А., Жаліло Я. А. *Пріоритети розвитку реального сектора в умовах війни та повоєнного відновлення економіки України*: аналітична доповідь. Київ : НІСД, 2024. 104 с. DOI: <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.03>
22. Твердоелектролітні батареї Honda встановлять новий стандарт запасу ходу. IONITY. 2024.  
URL: <https://ionity.ua/news/tverdoelektrolitni-batareyi-honda-vstanovlyat-novyj-standart-zapasu-hodu/>
23. Яковлева А., Бойченко С., Лейда К., Іванченко О., Фролов В. *Екологістика, рециклінг і утилізація транспорту*. Київ : НАУ, 2019. 266 с.
24. Vača P., Vanýsek P. Issues Concerning Manufacture and Recycling of Lead. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 11. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16114468>
25. Borge-Diez D., Icaza D., Açikkalp E., & Amaris H. (2021). Combined vehicle to building (V2B) and vehicle to home (V2H) strategy to increase electric vehicle market share. *Energy*. Vol. 237. 121608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121608>
26. *Global EV Outlook 2024*. IEA, 2024. 174 p. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
27. Hill N., Raugé M., Pons A., Vasileiadis N., Ong H., Casullo L. *Research for TRAN Committee – Environmental challenges through the life cycle of battery electric vehicles*. European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels, 2023. 83 p.

28. Leach F., Kalghatgi G., Stone R., Miles P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*. 2020. Vol. 1. 100005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>
29. Pivnyak G., Olishevskaya V., Olishevskiy H., Lutsenko I., Lysenko A. Comprehensive research of electric cars development and related infrastructure in Ukraine. *Physical & Chemical Geotechnologies : 8<sup>th</sup> International Conference E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 567. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456701025>
30. Salek F., Resalati S., Babaie M., Henshall P., Morrey D., Yao L. A Review of the Technical Challenges and Solutions in Maximising the Potential Use of Second Life Batteries from Electric Vehicles. *Batteries*. 2024. Vol. 10 (3). P. 1–40. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries10030079>
31. Sharma P. Study of Electric Vehicle Market Dynamics and Forecasting. *Shodh Sagar Journal of Electric Vehicles*. 2024. Vol. 1. № 1. C. 25–30. DOI: <https://doi.org/10.36676/jev.v1.i1.4>

V. E. OLISHEVSKA<sup>1\*</sup>, H. S. OLISHEVSKIY<sup>2\*</sup>, H. P. IVANOVA<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. of Automobiles and Automobile Economy, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (099) 36 68 845, e-mail [olishevskaya.v.e@nmu.one](mailto:olishevskaya.v.e@nmu.one), ORCID 0000-0002-3098-1351

<sup>2\*</sup>Dep. of Electric Power Engineering, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 56 51 830, e-mail [Olishevskiy.H.S@nmu.one](mailto:Olishevskiy.H.S@nmu.one), ORCID 0000-0001-9576-7527

<sup>3\*</sup>Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 45 29 945, e-mail [ivanova.h.p@nmu.one](mailto:ivanova.h.p@nmu.one), ORCID 0000-0003-4219-7916

## Electric Vehicle Batteries: Technical and Environmental Aspects

**Purpose.** The transition to electric vehicles can be considered a promising direction for the development of motor transport, and one of the key elements that ensures the functioning and determines the prospects for the development of electric vehicles is batteries. The main objective of this work is to study the technical and environmental aspects of the production, operation, and disposal of electric vehicle batteries in Ukraine. **Methodology.** To assess the impact of batteries on the development of electric vehicles, it is advisable to study their production, operation, and decommissioning (disposal). Today, the main problems associated with electric vehicle batteries at the production stage are: the need to use critical raw materials; difficulties in producing high-capacity and inexpensive batteries; improving the basic parameters of batteries; and environmental pollution. During the operation stage, important challenges include changes in battery parameters and the decarbonization of the electricity used during operation. Decommissioning batteries is a difficult task because many different materials are used in the production of components, and different technologies are required for their recycling at the disposal stage. **Finding.** The current state, technical, and environmental aspects related to the production, operation, and disposal of electric vehicle batteries are analyzed. It is shown that batteries significantly affect the cost of electric vehicles, determine their mileage and ease of use, and have an environmental impact. It is emphasized that secondary batteries (second-life batteries) can be used to create energy storage systems, charging stations for electric vehicles, and microgrid energy systems. **Originality.** A comprehensive analysis of the problems of production, operation, and recycling of rechargeable batteries was carried out, which allows identifying their impact on the competitiveness, cost-effectiveness, and environmental friendliness of electric vehicles. The main trends in the development of electric vehicle rechargeable batteries in Ukraine were identified. The problems of manufacturing and recycling rechargeable batteries were considered. It is emphasized that the development of innovative technologies for the creation of efficient, safe, and affordable rechargeable batteries is an important step towards the transition to environmentally friendly transport in Ukraine. **Practical value.** The main trends in the use of electric vehicle rechargeable batteries that can be developed in Ukraine are identified, and the problems of their manufacture and recycling are considered.

**Keywords:** decarbonization; electric vehicle; rechargeable battery; technologies; materials; critical raw materials; environmental impact

### REFERENCES

1. Bahach, R. (2023). Research of electric vehicle battery packs and charging stations based on an active three-phase rectifier. *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, 24, 62–71. DOI: <https://doi.org/10.30977/veit.2023.24.0.2> (in Ukrainian)

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

2. Bazhynov, O. V., & Kravtsov, M. M. (2022). *Nebezpeka transportnykh zasobiv: monohrafiia*. Kharkiv: ChP Starychenko L. A. (in Ukrainian)
3. Emissions from transport and how to deal with them. *Employers's Federation of of Automotive Industry*. Retrieved from <https://fra.org.ua/uk/an/publikatsii/analitika/vikidi-vid-transportu-i-iaak-z-nimi-borotisia> (in Ukrainian)
4. Gnatov, A. V. (2021). *Budova hibrydnykh avtomobiliv i elektromobiliv: konspekt lektsii z dystsypliny*. Kharkiv: KhNADU (in Ukrainian)
5. Golub, M. Yu. (2024). *Udoskonalennia systemy povodzhennia z vidpratovanymy litiionnymy akumuliatoramy dlia elektromobiliv* (Bachelor's thesis). Dnipro. (in Ukrainian)
6. *Deiaki pytannia ob'ektiv krytychnoi infrastruktury*. (2020). Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text> (in Ukrainian)
7. Zaporozhets, O. I., Boichenko, S. V., Matvieieva, O. L., Shamanskiy, S. Y., Dmytrukha, T. I., & Madzhd, S. M. (2017). *Transportna ekolohiia*. Kyiv: NAU. (in Ukrainian)
8. Ivanova, H. P., Olishevskaya, V. Ye., Hapieiev, S. M., & Olishevskaya, S. O. (2024). Construction Industry in Ukraine: Transformations and Prospects in the Context of Martial Law and Postwar Reconstruction. *Science and Transport Progress*, 4(108), 80-88. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/317405> (in Ukrainian)
9. Kushka, M. M., & Kryvorot, A. I. (2024, May). Ohliad akumuliatornykh batarei elektromobiliv. In *Tezy 76-yi nauk. konf. vy-kladachiv, naukovykh pratsivnykiv, aspirantiv ta studentiv Natsionalnoho universytetu «Poltavska politekhnikha imeni Yurii Kondratiuka»* (Vol. 1, pp. 268-270). Poltava, Ukraine. (in Ukrainian)
10. Lakhtadyr, S (2024). Environmental aspects of battery production and disposal. *Science and Technology Today*, 13(41), 1110-1119. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13\(41\)-1110-1119](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-1110-1119) (in Ukrainian)
11. Lynnyk, I. E., Lezhneva, O. I., Dorozhko, Ye. V., Vakulenko, K. Ye., Sokolova, N. A., & Afanasieva, I. A. (2020). *Ekolohichni aspekty avtotransportnoho kompleksu: monohrafiia*. Kharkiv: Vydavnytstvo «Smuhasta typohrafiia. (in Ukrainian)
12. Nefedov, V. H., & Polishchuk, Yu. V. (2013). *Elektrokhimichna enerhetyka. Svyntsevi akumuliatory: ulash-tuvannia, vyrobnytstvo, rozrakhunky*. Dnipropetrovsk: DVNZ UDKhTU». (in Ukrainian)
13. Nykyforuk, O. I., Chukayeva, I. K., Piriashvili, B. Z., Lyashenko, O. F., Karpov, V. M., Kudrytska, N. V. ..., & Plyuta, I. Yu. (2017). *Rozvytok infrastrukturykh sektoriv yak chynnyk realizatsii priorytetnykh napriamiv eko-nomichnoi polityky Ukrainy: kolektyvna monohrafiia*. NASU, SI «Institute of Economics and Forecasting of the NAS of Ukraine». Kyiv. (in Ukrainian)
14. Olishevskaya, V. E., Ivanova, H. P., & Olishevskiy, H. S. (2025). Recycling Lead Acid Car Batteries: Challenges and Prospects. *Science and Transport Progress*, 1(109), 142-151. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/325342> (in Ukrainian)
15. Olishevskaya, V. E., & Olishevskiy, H. S. (2023, April). Motor transport ecological influencing on an environment. In *Innovative Technologies of Personnel Training for Industry and Transport 2023: Conference Proceedings* (pp. 147-152). Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian)
16. Olishevskaya, V., & Olishevskiy, H. (2024). Substantiating rational rolling stock at an enterprise in the transition to electric vehicles. *Avtoshliakhovyk Ukrayiny*, 2, 35-44. DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-35-44> (in Ukrainian)
17. Pyndus, Yu. I., & Zaverukha, R. R. (2016). *Elektronne ta mikroprotseorne obladnannia avtomobiliv: navchalnyi posibnyk*. Ternopil: TNTU. (in Ukrainian)
18. *Rol i mistse ukrainskoi enerhetyky u svitovykh enerhetychnykh protsesakh*. (2018). Kyiv. Retrieved from [https://razumkov.org.ua/uploads/article/2018\\_ENERGY\\_PRINT.pdf](https://razumkov.org.ua/uploads/article/2018_ENERGY_PRINT.pdf) (in Ukrainian)
19. Serpen stav rekordnym misiatsem dlia elektromobilnosti v Ukraini. (2024). *IONITY*. Retrieved from <https://ionity.ua/news/serpen-stav-rekordnym-misyaczem-dlya-elektromobilnosti-v-ukrayini/> (in Ukrainian)
20. Smyrnov, O., & Borysenko, A. (2023). Comparative analysis of electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, 24, 50-61. DOI: <https://doi.org/10.30977/veit.2023.24.0.5> (in Ukrainian)
21. Sobkevych, O. V., Shevchenko, A. V., Rusan, V. M., Bielashov, Ye. V., Zhurakovska, L. A., & Zhalilo, Ya. A. *Priorytety rozvytku realnoho sektora v umovakh viiny ta povoiennoho vidnovlennia ekonomiky Ukrainy: analitychna dopovid*. Kyiv: NISS. DOI: <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.03> (in Ukrainian)
22. Tverdoelektrolitni batarei Honda vstanovliat novyi standart zapasu khodu. (2024). *IONITY*. Retrieved from <https://ionity.ua/news/tverdoelektrolitni-batareyi-honda-vstanovlyat-novyj-standart-zapasu-hodu/> (in Ukrainian)
23. Yakovleva, A., Boichenko, S., Leida, K., Ivanchenko, O., & Frolov, V. (2019). *Ekolohistyka, retsyklinh i utylizatsiia transportu*. Kyiv: NAU. (in Ukrainian)

24. Bača, P., & Vanýsek, P. (2023). Issues Concerning Manufacture and Recycling of Lead. *Energies*, 16(11), 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16114468> (in English)
25. Borge-Diez, D., Icaza, D., Açikkalp, E., & Amaris, H. (2021). Combined vehicle to building (V2B) and vehicle to home (V2H) strategy to increase electric vehicle market share. *Energy*, 237, 121608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121608> (in English)
26. *Global EV Outlook 2024*. (2024). IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> (in English)
27. Hill N., Raugei M., Pons A., Vasileiadis N., Ong H., & Casullo L. (2023). *Research for TRAN Committee – Environmental challenges through the life cycle of battery electric vehicles*. European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels. (in English)
28. Leach, F., Kalghatgi, G., Stone, R., & Miles, P. (2020). The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*, 1, 100005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005> (in English)
29. Pivnyak, G., Olishevskaya, V., Olishevskiy, H., Lutsenko, I., & Lysenko, A. (2024). Comprehensive research of electric cars development and related infrastructure in Ukraine. *Physical & Chemical Geotechnologies: 8<sup>th</sup> International Conference E3S Web of Conferences*, 567, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456701025> (in English)
30. Salek, F., Resalati, S., Babaie, M., Henshall, P., Morrey, D., & Yao, L. (2024). A Review of the Technical Challenges and Solutions in Maximising the Potential Use of Second Life Batteries from Electric Vehicles. *Batteries*, 10(3), 1-40. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries10030079> (in English)
31. Sharma, P. (2024). Study of Electric Vehicle Market Dynamics and Forecasting. *Shodh Sagar Journal of Electric Vehicles*, 1(1), 25-30. DOI: <https://doi.org/10.36676/jev.v1.i1.4> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.02.2025

Прийнята до друку: 27.06.2025

# ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

UDC 621.333:004.891

E. K. MANAFOV<sup>1\*</sup>, H. B. GULIYEV<sup>2</sup>, F. H. HUSEYNOV<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. of Power Engineering and Automation, National Aviation Academy, Mardakan Ave., 30, Baku, Azerbaijan, AZ1045, tel. +994 (55) 741 79 39, e-mail [emanafov@naa.edu.az](mailto:emanafov@naa.edu.az), ORCID 0000-0001-5697-577X

<sup>2</sup>Dep. of Mechatronics, Azerbaijan Technical University, H. Javid Ave., 25, Baku, Azerbaijan, AZ1073, tel. +994 (50) 268 74 36, e-mail [huseyngulu@aztu.edu.az](mailto:huseyngulu@aztu.edu.az), ORCID 0009-0005-7362-0619

<sup>3</sup>Dep. of Electromechanics, Azerbaijan State Oil and Industry University, Azadliq Ave., 34, Baku, Azerbaijan, AZ1010, tel. +994 (50) 707 66 38, e-mail [huseynovferid17525257@gmail.com](mailto:huseynovferid17525257@gmail.com), ORCID 0000-0002-5325-0279

## Real-Time Assessment of the Technical Condition of Traction Motors Using Machine Learning and IoT Technologies

**Purpose.** The purpose of this research is to analyze machine learning algorithms, select the most accurate and efficient algorithm for diagnosing the technical condition of an induction traction motor based on operating parameters such as temperature, noise, and vibration, and study the features of using Internet of Things (IoT) technology to assess technical conditions in real time. **Methodology.** The machine learning algorithm suitable for diagnosing the technical condition of asynchronous traction motors was identified through analysis and comparative methods. **Findings.** Machine learning algorithms were analyzed, and two distinct algorithms, K-means and Extreme Machine Learning (EML), were selected for diagnosing the technical condition of asynchronous motors. The algorithms were compared based on performance metrics such as accuracy, specificity, sensitivity, positive predictive value, and negative predictive value. The results revealed that the EML algorithm outperformed K-means in these metrics, achieving an overall performance score of 93%. **Originality.** A novel system was proposed that integrates a machine learning model with IoT technology for real-time diagnostics of the technical condition of traction electric motors. This innovative approach enables dynamic monitoring of the motor's technical state. Compared to traditional temperature diagnostic systems, such a multi-parameter system will allow you to determine a specific malfunction. **Practical value.** The proposed system, based on a machine learning model, evaluates the technical condition of traction motors in real-time using IoT. It provides recommendations on when maintenance should be performed, based on the actual condition of the motor. The system allows for maintenance planning based on real-time diagnostics, facilitating a shift from scheduled maintenance to predictive maintenance strategies. This, in turn, increases operational lifespan and minimizes unplanned downtime. By leveraging IoT, the diagnostic system can integrate with motor control systems or SCADA systems, enabling remote monitoring and control of motor operations.

**Keywords:** traction motor; technical condition monitoring; fault detection; intelligent diagnostics; machine learning algorithms; predictive maintenance

### Introduction

Nowadays, asynchronous motors are the most widely used electric machines to drive mechanisms in various fields such as transportation, manufacturing, petroleum, and energy systems industries. 40–60% of the electric energy produced in the world is consumed by asynchronous motors with high reliability and efficiency, low cost, and stable operating speed. In addition to the high

reliability of asynchronous motors, it is also possible to have some inevitable failures due to overloads, mode changes, especially during transportation, variable environmental effects, failures during installation and maintenance, etc. It is known that failures associated with asynchronous motors are generally divided into two broad categories: electrical failures and mechanical failures [2, 7].

Electrical faults consist of stator faults and rotor faults, while mechanical faults include eccentricity (imbalance), bearing, and shaft faults. Statistically, among these, mechanical faults, especially bearing faults, are a serious problem for motors.

### Purpose

Bearings being an important equipment in the traction motor, the main purpose of its application is to ensure high speed and less friction. Heavy loads, increased mechanical stress, pollution, etc., cases can cause defects in the form of cracks on the surface of the bearings. In addition, increased loads can increase the severity of cracks, which are the main cause of bearing failure. To overcome these challenges, faults must be detected and diagnosed early as part of preventive maintenance. Early diagnosis and detection of faults is also one of the most important issues in transportation, as it is an important tool to prevent damage that can cause disruptions in the entire system.

Preventive maintenance is based on monitoring the condition of the traction electric motor (TEM) and allows for the prediction and prevention of faults in time before they occur. This increases the reliability of the TEM and reduces maintenance costs. Condition monitoring of the TEMs consists of several main stages: determining the fault location; detection of faulty parts; diagnosis of faults and their causes in the relevant parts; prediction of faults and prevention of faults before they occur.

These stages are carried out with the help of sensors installed in the TEM that measure voltage, current, temperature, vibration, and noise level. Recently, the monitoring of the technical condition of devices based on machine learning methods (ML) has become more and more important [1, 4, 10, 11].

Today, the development of ML has become a leading direction in fault diagnosis. The ML model is a subset of artificial intelligence (AI), and it collects data using various sensors placed on the TEM under different operating conditions.

### Methodology

The main machine learning algorithms used to determine the technical condition of TEMs are:

*Fault detection with unsupervised learning.* K-means clustering helps to identify faulty conditions by grouping various operating

parameters. Density-Based Spatial Clustering of Noisy Applications – DBSCAN is an unsupervised learning algorithm known as the density-based clustering method. DBSCAN defines clusters based on the density in a dataset and is mainly used to identify abnormal or noisy points in the data. Principal Component Analysis – PCA – facilitates the detection of abnormal conditions in motor operation through dimensionality reduction and feature detection.

*Diagnosis of faults with supervised learning.* Decision Trees and Random Forests are used to make diagnostic decisions by classifying different types of faults. Support Vector Machines – SVM – performs classification by drawing a boundary to separate normal and faulty motor conditions. Neural Networks – improve fault diagnosis by learning complex fault models.

*Fault detection based on reinforcement learning.* Q-learning and Deep Q-Nets – DQN – dynamically monitor the operating status of TEMs and suggest strategies to minimize the risks of failures by determining the most suitable operating mode.

*Time series analysis.* Recurrent Neural Networks – RNN and Long Short-Term Memory – LSTM – help to predict the long-term status and possible failures of the TEM by examining changes in sensor data over time. Integrated Moving Average with Auto Regression – ARIMA – predicts what changes will occur in the future based on the history of TEM parameters.

*Deep learning for predictive maintenance.* Convolutional Neural Networks – CNN – predict different types of failures by extracting features from large amounts of sensor data, such as vibration or noise analysis. Autoencoders – learn the normal operating mode and detect anomalies, especially in cases where the TEM parameters deviate from the standard profile.

*Feature extraction and selection algorithms.* Wavelet Transforms and Fourier Transforms – analyze vibration and noise signals to extract features that may indicate changes and failures in the TEM. Mutual Information and Correlation Analysis – ensures that only information that directly affects the condition of the TEM is used, identifying the most important characteristics.

Thus, with the combination of these algorithms, it is possible to accurately and effectively determine

the technical condition of electric motors. The applied methods are selected and optimized based on the type of data received from the motor, the amount of data, and the type of faults [4, 8, 10, 16, 19].

The machine learning algorithms used to determine the technical condition of electric motors can vary depending on factors such as the quality and quantity of data, as well as the nature of specific faults.

*Support Vector Machines – SVM.* SVM, one of the supervised learning methods, is one of the algorithms effectively used in diagnosing motor faults. This algorithm is especially suitable for classifying nonlinear and complex data. SVM is superior in detecting motor faults due to a number of basic features:

*Signal processing and classification.* Electric motors produce different types of signals while operating, and in the event of a fault, there are changes in these signals. SVM can distinguish between normal and faulty situations by classifying these signals. At this point, it is important to select and process the features correctly, because the classification accuracy of SVM depends on it.

*Linear and nonlinear detection.* SVM can classify motor fault types as linear and nonlinear. For nonlinear problems, SVM maps the data to a higher dimension using kernel functions, thus enabling nonlinear classification.

*Vibration and noise analysis.* One of the most common faults in electric motors is bearing failure, which is reflected in vibration analysis. SVM can detect abnormalities and determine the type of fault by processing the vibration data.

*Detection accuracy.* SVM can accurately determine the type of fault by classifying it into two or more classes based on training data. This approach allows you to determine the exact type of fault and take timely repair or replacement measures.

*Working with large-scale data.* The data collected from the motor is large and has a complex structure. SVM is ideal for working with large volumes of data and processing them with high accuracy. This helps to detect the fault at an early stage.

Diagnosis of motor faults with the help of SVM is carried out in the following order.

*Data collection and processing.* Real-time or historical data is collected from the motor. This data is first processed and separated into features, for example, features are extracted by methods such as spectral analysis of the current or the Fourier transform of vibration.

*Algorithm training.* Based on the collected features, the algorithm is trained. Labeled data representing normal and faulty states are fed to the SVM, and the SVM draws a boundary between these classes. Choosing the correct kernel function and parameter values during training increases the accuracy of the SVM.

*Testing and performance evaluation.* After training, the algorithm is tested and its performance is evaluated according to criteria such as precision, sensitivity, and recall. Hyperparameter tuning of SVM parameters is important for high performance.

*Real-time monitoring.* The trained SVM model is applied for real-time signal processing and instant error type determination. The model can detect potential errors in time by analyzing new data.

SVM has advantages such as high-accuracy classification, non-linear data structuring, fault detection and prediction at an early stage, long training time for large data, difficulties in adjusting parameters correctly, and proper selection of kernel (the choice of kernel affects the performance of the algorithm) [3, 9, 10, 16, 19].

The SVM algorithm is very useful in the fault diagnosis of electric motors because it supports the reliable operation of motors with features such as accuracy, stability, and overcoming nonlinear problems.

The main purpose here is to classify the signals received from TEM and determine their faulty or normal states. Let's consider the SVM-based motor fault diagnosis sequence.

*Selection and preparation of features.* Various signals are analyzed to determine the status of electric motors. From these signals, the necessary features for detecting faults are extracted. The following steps are taken to create the features. Frequency and amplitude analysis – there are changes in vibration and current frequencies in faulty motors. Frequency and amplitude data are obtained from the signals by analysis methods such as FT. Statistical parameters – statistical parameters such as mean, variance, maximum, and minimum

signals are calculated. The specified features are used as input data in the SVM model.

*Determination of the objective function.* The objective function of SVM is expressed as follows and is optimized to classify the motor signals into two classes: normal and faulty.

$$\min f \cdot \frac{1}{2} \|\tau\|^2$$

here,  $\tau$  – defines the direction of the optimum separation line between the features received from the motor. Minimizing the objective function maximizes the difference between the classes, allowing for a more accurate separation of the classes.

*Application of limiting conditions.* For fault detection, each state of the motor must be classified according to the limiting conditions of the SVM:

$$y_i (\omega \cdot x_i + v) \geq 1$$

here  $y_i$  – indicates the class label; in the fault case it is set to  $y = -1$  and in the normal case it is set to  $y = +1$ ,  $x_i$  – is the feature vector,  $v$  – is a free parameter.

These conditions are ensured so that the properties of the fault states remain on one side of the separation line and the normal states remain on the other side. Constraints increase the classification accuracy of the model and allow more accurate separation of failure states.

*Choosing a Kernel function.* In electric motors, Faults may incorporate nonlinear data. To improve performance of SVM in such situations, Kernel functions are employed. RBF kernel helps in classifying motor signals by non-linear separation of patterns from the separation line.

Kernel functions, such as RBF, aid in the advanced recognition of faults within the signals from the motor. The RBF kernel allows for motor signal components non-linear to the fault detection oscilloscope to be non-linearly separated. The Kernel function is the tool that divides non-linear classes in the lower dimensions and classifies them in the higher dimensions.

*Training and testing models.* The SVM model is trained with the available training data. The training set employs the features of the received signals from the motor with respect to the normal operational condition as well as the fault operational condition.

After training the model, it is subjected to the test data so that the results can be measured against criteria such as accuracy, quality, and recall.

Optimally tuning kernel parameters together with the C parameter yields precise results for the SVM model sustenance. This parameter controls the trade-off made between the margin and the number of misclassifications. This value ought to be determinable within a reasonable range to fulfill the timely detection of failing motors.

*Real-time application.* Once the SVM model is trained, it can monitor signals from the motor in real-time and instantly identify any fault conditions. In a real-time setting, the model integrates new features to anticipate failure scenarios and issue alerts for prompt intervention. This method not only extends the lifespan of motors but also lowers maintenance expenses and reduces the likelihood of accidents that could arise from failures.

SVM is a machine learning model that linearly classifies different classes of data. This model can learn even with a small number of examples and has high generalization ability. The structure of SVM is shown in Figure 1.

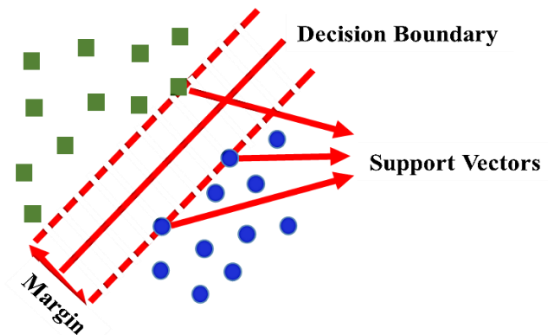


Fig. 1. Support vector machine architecture

A hyperplane is a decision boundary that linearly classifies the data; and the support vectors are the data closest to the hyperplane. Margin refers to the distance between the support vectors and the hyperplane.

In SVM, the hyperplane is expressed as:

$$d(x) = wx_i + b$$

where  $x_i$  – is the input data,  $w$  – is the weight vector perpendicular to the hyperplane, and  $b$  – is the bias. The length of the margin is calculated by the following equation:

$$\text{margin} = \frac{2}{\|w\|} + C \sum_{i=1}^n \xi_i$$

where,  $\xi_i$  – is a smoothness variable added to adjust the misclassification rate when the data cannot be linearly classified in SVM, and  $C$  is a user-defined parameter. The higher the  $C$  value, the lower the allowable misclassification rate. In SVM, a hyperplane that maximizes the margin size should be selected. For this purpose, we set the minimum value of  $w$ . This is an optimization problem, and the constraint and objective function are given by Equations (1) and (2), respectively. The Lagrange emphasis method was used for optimization. The Lagrange emphasis method obtains a variable solution with partial derivative value equal to zero for all variables from the equation, which is obtained by multiplying the value of the constraints on the objective function by a new variable  $\alpha$ . The final classification function of SVM obtained using the Lagrange emphasis method is expressed as follows:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N a_i y_i K(x_i, x) + b$$

where  $a_i$  – is the Lagrange emphasis,  $y_i$  – The output data,  $N$ , represents the number of samples in the training data, and  $K$  – is the kernel. The kernel is used to transfer data to higher dimensions in non-linear classifications where the data cannot be linearly classified. A radial basis function (RBF) kernel was used in this study. The RBF kernel is expressed as:

$$K(x_i, x) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x\|^2}{2\gamma^2}\right)$$

where  $\gamma$  – is a user-defined parameter that controls the flexibility of the decision boundary.

*Decision Trees and Random Forest.* The application of Decision Trees and Random Forest algorithms is effective for determining faults of electric motors. These algorithms help classify motor failure types and identify potential problems based on features in the data. These algorithms are particularly useful for monitoring the condition of components such as bearings, stators, rotors, etc. in electric motors and determining faults.

Decision Trees are a simple and effective classification algorithm. Based on the data collected

from the electric motors, the tree structure is built by selecting the features.

The decision tree algorithm operates based on the following steps:

*Feature selection.* Data gathered from the motor, such as vibration, current, and temperature, serve as features for classification. Each feature can significantly influence the representation of fault conditions in the motor. For instance, in the case of a bearing fault, the vibration feature is crucial, whereas for a stator fault, changes in current are more telling.

*Classification setup.* A decision tree formulates decision rules at each node by selecting the optimal classification points (splits) based on the features. For example, a decision node might state «Vibration > 0.5 mm/s» or «Temperature > 90 °C» Each node aids in pinpointing the fault condition, thereby enhancing the classification process.

*Metrics for classification.* Decision trees identify the best split points using methods like entropy or the Gini index during data splitting. These techniques help improve the accuracy of the classification within the tree.

The Random Forest algorithm is a very powerful algorithm that consists of a combination of several decision trees. Random Forest is widely used to improve accuracy in fault diagnosis of electric motors. The working principle of the Random Forest algorithm is implemented in the following order.

Random Forest is built by creating several decision trees, each trained on different subsets of data and features. By using bootstrapping, each tree learns to develop its own classification rules, allowing for varied analyses of motor faults.

During the creation of each tree, features are chosen at random. This randomness helps the model remain flexible and ensures that decisions are made based on a diverse set of features.

The final classification in Random Forest is determined through majority voting. Each decision tree casts its vote, and the most common classification among them is selected. This approach minimizes the chances of misclassification and enhances the overall reliability of the outcomes.

Decision Trees and Random Forest algorithms build decision rules in a tree structure using various features in the data to classify electric motor faults.

The theoretical foundations and formulas of these algorithms play an important role for fault determination.

*K-means algorithm.* K-means is an unsupervised learning algorithm (ULA) that combines datasets into unique subsets. It is also called center-based clustering algorithm [4]. Unique subgroups are called clusters. It takes the data as the center value and minimizes around the center according to the data distance. The function of the K-means algorithm is expressed as follows:

$$J(V) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{a_i} (\|b_i - c_i\|)^2$$

where,  $a$  – is the number of cluster centers;  $a_i$  – is the number of data points in the first cluster;  $b_i$  and  $c_j$  – are the Euclidean distance (closest distance) between  $b_i$  and  $c_j$ ;  $b_i$  – is a set of data points; and  $c_j$  – is the set of cluster centers [1, 8–11, 16, 19].

The sequence of operation of the K-means algorithm consists of the following:

- Randomly determines the center (i) from the given data points (bj);
- Compares other data points according to the nearest center;
- Still recalculates the surrounding data set for the center and forms another set;
- Convergence is checked and step II is performed again, and so on.

*Extreme Machine Learning algorithm.* Extreme machine learning (EML) is a supervised learning model that combines several learning models to improve ML results. The EML algorithm is divided into two groups, basic and advanced techniques. The EML and its activation function ( $\psi_i$ ) are expressed as follows:

$$a_n = \sum_{i=1}^h \beta_i \psi_i(b_n) = \sum_{i=1}^h \beta_i \psi_i(x_i b_n + \gamma_i)$$

where,  $h$  – hidden nodes; weight vector between input node  $x_i$  and hidden node  $i$ ;  $\beta_i$  – is the weight vector between the output node and the  $i$ th hidden node; and  $\gamma_i$  – is the threshold for the  $i$ th hidden node.

The steps involved in the EML algorithm are as follows:

- Launch data subgroups for training;
- Captures data sets and builds a system to better predict and summarize performance;
- A decision is made using any of the clustering techniques.

Single-hidden Layer Feed-forward Neural Network (SLFNN) is used as a classifier to classify traction motors in good condition and requiring maintenance [5, 9–13]. In addition, a differentiator function is used to select the input significances and biases of the hidden layer.

*Combined use of machine learning algorithms in fault determination of electric motors.* The combined use of K-means, External Machine Learning, Decision Tree, and Random Forest Algorithms in determining the faults of electric motors requires the synthesis of mathematical models and algorithmic approaches. This model combines the advantages of each algorithm to provide more accurate and reliable fault diagnosis. Now let's consider the mathematical models of these algorithms and their joint use.

*K-means clustering* involves dividing the data into  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  clusters. The objective of this model is to identify the cluster centers and allocate the data points to the clusters that are nearest to these centers.

- Cluster centers  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  are selected.
- Data are divided into clusters:

$$\arg \min_j \|x_i - c_j\|^2$$

where  $i = 1, 2, \dots, n$  and  $j = 1, 2, \dots, k$

- Renovation of centers:

$$c_j = \frac{1}{|S_j|} \sum_{x_i \in S_j} x_i$$

where  $S_j$  – is the set of elements in the  $j$ th cluster.

*Extreme Learning Machine (ELM)* utilizes random weights and biases in the input layer. This model enables a quicker training process, allowing for accurate output predictions.

- Connection between input and output:

$$H = f(W \cdot X + b)$$

where  $H$  – is the hidden layer,  $W$  – is the input layer weights,  $b$  is the bias,  $X$  – is the input data, and  $f$  – is the activation function.

– Output prediction:

$$Y = H \cdot \beta$$

where  $Y$  – is the output of the model and  $\beta$  – is the weights of the output layer.

– Weight adjustment:

$$\beta = (H^F H)^{-1} H^F F$$

where  $F$  – is the target output.

*Decision Tree* classifies data by making partitioning decisions at each node. The core idea behind the decision tree model is to enhance the information gained from each data partition.

– Gini index (to measure the homogeneity of the classification):

$$Gini(D) = 1 - \sum_{i=1}^c p_i^2$$

where  $p_i$  – is the probability of class  $i$ .

– Section by feature:

$$Gini(D, A) = \sum_{v \in A} \frac{|D_v|}{|D|} Gini(D_v)$$

– Choosing the optimal feature:

$$\arg \min_A Gini(D, A)$$

4. *Random Forest*. Random Forest consists of several decision trees, and the results of each tree are combined to obtain a final result.

– Adjustment of decision rules for each tree:

$$Y_i = f_i(X) \\ i = 1, 2, \dots, n$$

where  $f_i$  – is the function of the  $i$ th tree.

– Final forecast:

$$Y_{final} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

*Using the Collaborative Model*. The joint use of these algorithms occurs in the following stages:

– Clustering with K-means. Motor data is clustered with k-means. As a result, the centers of each given group are found.

– Learning with ELM. The clustered data are fed into the ELM model. The output of the ELM model is used to determine the fault type.

– Classification with Decision Tree and Random Forest. The results from ELM are fed into Decision Tree and Random Forest models. The prediction of each tree is combined to obtain a final fault classification.

With the joint application of the mentioned models, more accurate, fast, and reliable results can be obtained in the detection of faults of electric motors. Mathematical models of each algorithm provide a complete analysis of data and effectively implement the process of fault determination. The joint model is also useful for identifying new fault patterns with adaptive learning capabilities.

Thus, the aim of the research work is to create and implement an intelligent system to monitor the technical condition of TEMs operated in transport in real time by applying various machine learning algorithms and methods.

The article used two ML algorithms to evaluate the technical condition of the motor in real-time.

One of the most common components to fail in a TEM is the bearings. Bearing failures can occur due to overheating, fatigue, corrosion, contamination, excessive mechanical loading, and other factors. In this study, key diagnostic parameters such as voltage, current, temperature, noise level, and vibration are measured for 200 different TEMs (100 in good condition and 100 requiring repair). The data obtained from the TEM in the form of signals through sensors is analyzed using various transformations and methods. Signals generated under normal and abnormal conditions are examined. Additionally, the signals collected are fed into the machine learning unit as input data to assess the technical condition of the TEMs (Figure 2).

Thus, ML algorithms, i.e., K-means and EML draft, are used as classifiers for real-time assessment of technical states of TEMs and classification of faults. In addition, the effectiveness of the two different classifiers was measured in terms of accuracy, specificity, sensitivity, negative predictive value (NPV – which shows what percentage of the model's predictions for the negative category are correct and adds it to the sum of the actual values for the negative category), positive predictive value (PPV – which shows what percentage of the model's predictions in the positive category are correct and is calculated using various

indicators such as the sum of the actual values in the positive category).

The advantages of both classifiers are analyzed, and the best classifier is determined. Furthermore, the best classifier is used for the real-time Raspberry Pi-based hardware system. Figure 2 shows a block diagram for a real-time Raspberry Pi-based hardware system.

The main operating parameters of TEM are measured by five different analog sensors such as current sensor, voltage sensor, temperature sensor, vibration, and sound sensor. In addition, the analog signals from the sensors are converted to digital signals using the PCF8591 analog to digital converter (ADC) module.

In addition, the digital signals from the PCF8591 module are pre-processed using feature extraction methods, and these extracted informative features are passed as input to the ML classifiers.

Finally, the ML classifier provides support for deciding whether the traction motor is in good condition or requires maintenance. 85% of the data (both the traction motor in good condition and the traction motor requiring maintenance) is used to train the supervised learning classifier, and 15% of the data is used to test the supervised training classifier. Since K-means and EML are suitable for smaller size, numerical and continuous data, both ML algorithms are used as classifiers in the proposed work.

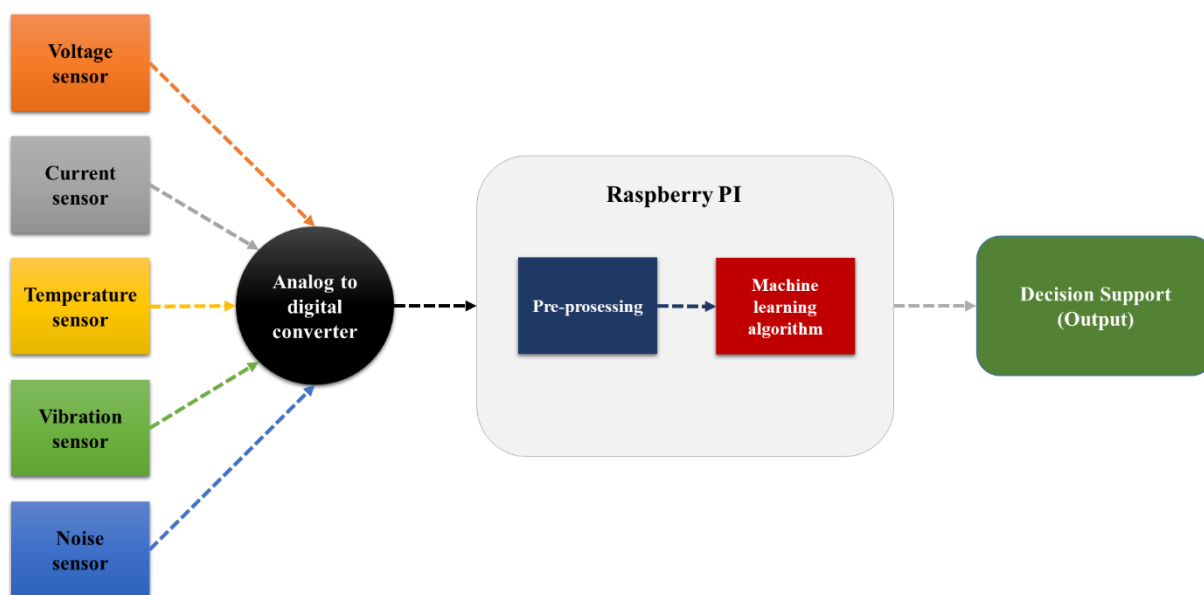


Fig. 2. Block diagram of the decision support unit

## Findings

*Comparative analysis of modeling results.* Figures 3 and 4 show the average accuracy and sensitivity values for the K-means and EML algorithms, respectively, in diagnosing the technical condition of TEMs. A total of 200 TEMs were analyzed for both the K-means and EML classifiers

within the TEM intelligent monitoring system. Of these 200 motors, 100 are in good condition, while the remaining 100 require maintenance, and these were used to train two different machine learning classifiers for monitoring purposes. In addition, 10 of the good-condition TEMs and 10 of the motors requiring maintenance were used to test the machine learning classifiers.

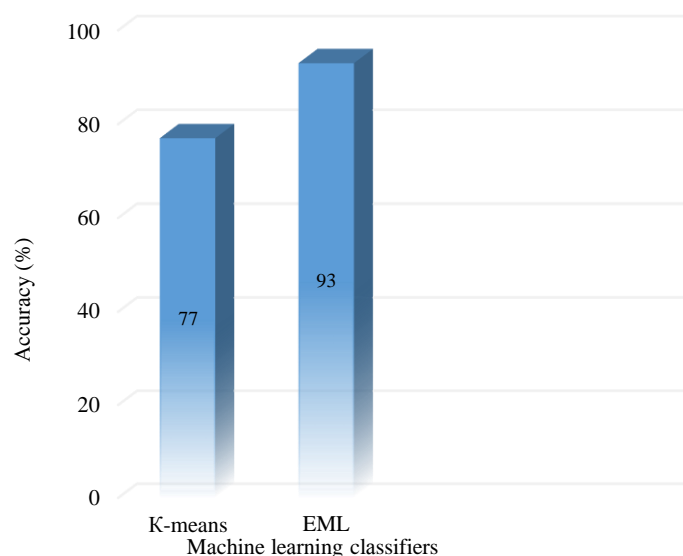


Fig. 3. Accuracy of TEM monitoring K-means and EML classifiers

The performance indicators of two different machine learning classifiers for TEM monitoring, specifically the K-means and EML classifiers, are presented in Table 1. During the testing of the monitoring system, it was found that the accuracy of the K-means classifier was 77%, while the accuracy of the EML classifier reached 93% (see Fig. 3). Additionally, the sensitivity and specificity for the K-means classifier were 73% and 81%, respectively, whereas for the EML classifier, these metrics were both 93% (refer to Figure 4 and Table 1).

Moreover, the positive predictive value (PPV) for the K-means classifier was 84%, and the

negative predictive value (NPV) was 71%. It was also noted that the performance characteristics, including sensitivity, accuracy, specificity, NPV, and PPV, were all at 90% for the EML classifier. Furthermore, the average performance of the EML classifier was found to be superior to that of the K-means classifier. Given that the EML classifier is more significant than the K-means classifier, it has been implemented on the Raspberry Pi using Python. It is also evident that diagnostics of the technical condition of the TEM can be conducted using the Raspberry Pi-based device.

Table 1

**Performance indicators of TEM monitoring,  
K-means and EML classifier**

No.	Indicators	K-means	EML
1.	Accuracy	77 %	93 %
2.	Specificity	81 %	93 %
3.	Sensitivity	73 %	93 %
4.	NPV	71 %	92 %
5.	PPV	84 %	92 %

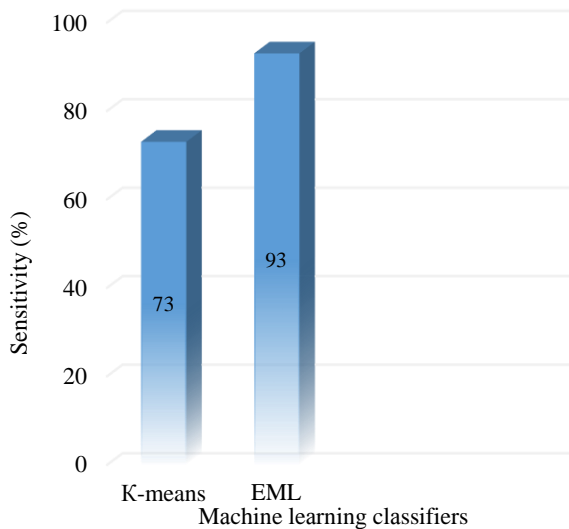


Fig. 4. TEM monitoring K-means and sensitivity of EML classifier

*A monitoring system based on the Internet of Things.* Recently, attention has been paid to the creation of a system for monitoring the technical condition of devices using the Internet of Things (IoT) system [3, 5, 6, 9, 14, 16, 19]. A typical IoT instrument contains the sensor to collect data, signal processing for sensor output, an ADC, digital logic, and internet connectivity for decision-making, and signal processing to activate an actuator in response to detected input. Smart sensors have the intelligence to provide direct digital data for measured parameters, ready for transmission to the gateway.

Digital logic and signal processing are part of these sensors. Digital logic consists of a microprocessor unit (MPU) that performs algorithmic functions such as filtering, compensation, and other signal converters. The built-in MPU of smart sensors can also be used to provide calibration data for the sensor, monitor abnormality in production parameters, make quick and immediate decisions during malfunctions, and issue alarms to prevent malfunctions. This will reduce the processing load on the digital processing processor of IoT systems. Smart sensors usually communicate with a central processing system in case of major faults or exceptions. Some of the smart sensors have a self-diagnostic feature, which is achieved by having two sensing elements in the sensor. The results are sent by the sensor to the central processing unit after comparing the outputs of both elements [3–5, 6, 9, 14, 19].

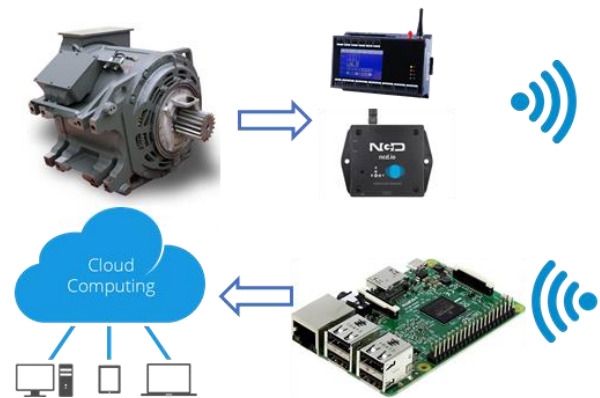


Fig. 5. Data collection from the TEMs with IoT-based sensors and transmission to the cloud system

Taking into account the characteristics of these sensors, it is possible to achieve a real-time assessment of the technical condition of TEMs operated in transport by measuring the main operating parameters. The IoT-based motor diagnostic monitoring system is specially designed to monitor the technical condition and performance of electric motors using IoT technology. This type of system uses sensors, connectivity, data analytics, and diagnostic algorithms to continuously assess the condition of traction motors and predict potential problems [1, 4, 6, 12, 15, 17–19].

*Sensor placement.* Sensors are installed on the electric motor and its related components to measure various parameters such as temperature, current, voltage, noise, and vibration. These sensors can be mounted directly on the TEM or added externally.

*Data acquisition and transmission.* Sensors collect real-time data from the TEM and transmit it to a central server or cloud platform via wired or wireless communication protocols such as Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, or cellular networks. The data includes information about TEM operating conditions, performance indicators, and any abnormalities detected by the sensors.

*Data storage and processing.* Collected data is stored and processed locally or in the cloud. Advanced analytics techniques such as machine learning algorithms are applied to analyze the data and identify patterns, trends, or abnormalities that may indicate potential TEM problems.

*Diagnostic algorithms.* Diagnostic algorithms are used to process sensor data and evaluate the condition of TEMs. These algorithms can utilize

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

rule-based systems, statistical analysis, or machine learning models to detect faults, predict failures, and calculate the TEM's remaining residual resource.

*Alerts and notifications.* When an abnormality or potential issue is detected with the TEM, the system generates alerts or notifications to inform maintenance personnel or operators. These alerts can be sent via email, SMS, or specialized applications, allowing for timely intervention to prevent unexpected interruptions or failures.

*Predictive maintenance.* By continuously monitoring TEM condition and performance, an IoT-based diagnostics system enables predictive maintenance strategies. Maintenance activities can be scheduled based on the actual condition of the TEM. This approach maximizes service life and minimizes downtime.

*Integration with motor management systems.* In some cases, IoT-based TEM diagnostic systems can be integrated with motor management systems or SCADA systems to provide remote monitoring and control of TEM operations.

This integration allows operators to adjust traction motor parameters and operations as needed in response to detected problems.

An IoT-based TEM diagnostic monitoring system enhances the reliability, efficiency, and safety of TEMs used in transportation. These systems provide deeper insights into the technical condition and performance of the TEM, enabling proactive maintenance and optimization of TEM operations. Figure 6 illustrates the intelligent system designed for monitoring the technical condition of the TEM using the IoT.

Thus, data obtained from TEM through intelligent sensors are collected in real time and archived in a database based on cloud technology. Based on the received data, the traction motor's technical condition parameters are compared with the normal condition parameters, and the output signal is processed. With the output signals, the technical condition of the TEM is assessed in real time and the decision is made to provide maintenance if necessary.

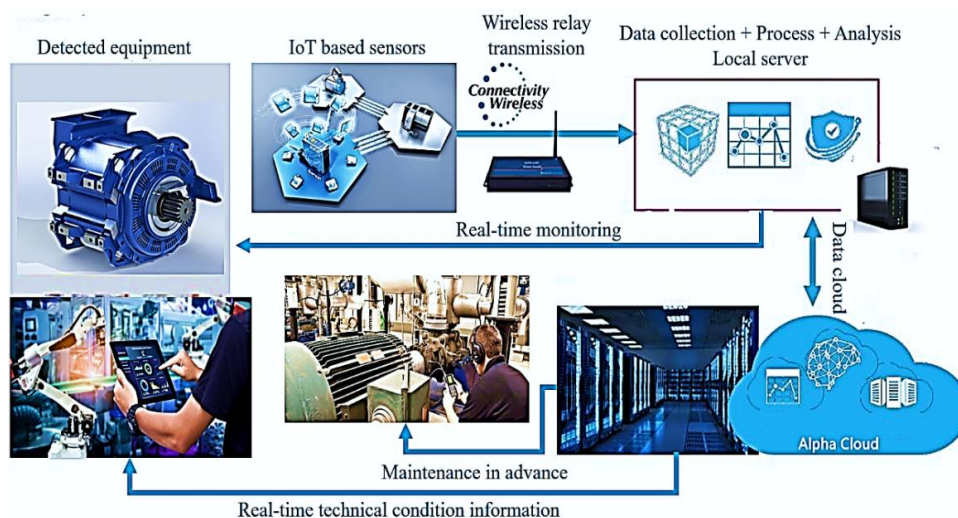


Fig. 6. IoT based traction motor condition monitoring system

### Originality and practical value

To diagnose the technical condition of the TEM in real-time, utilizing IoT capabilities within a machine learning-based intelligent monitoring system represents a new area of research. This approach enables dynamic monitoring of the TEM's technical condition. Compared to traditional temperature diagnostic systems, such a multi-

parameter system will allow you to determine a specific malfunction. Therefore, it is essential to develop and implement such a monitoring system.

### Conclusion

This work discusses the development of a machine learning-based intelligent system designed for real-time monitoring of the technical condition of TEMs. By utilizing two different

machine learning classifiers, K-means and EML, we compared their advantages in terms of accuracy, sensitivity, specificity, positive predictive value, and negative predictive value. The findings indicate that EML outperforms the K-means classifier, achieving an overall superiority rate of 93%. In contrast, the accuracy and sensitivity of the K-means classifier were found to be 77% and 73%, respectively. These results demonstrate that the EML classifier exhibits superior performance compared to K-means.

Furthermore, the EML classifier can be integrated into the machine learning-based intelligent system for real-time monitoring of electric motors' technical conditions. Additionally,

the proposed model can connect to an IoT cloud server, enabling dynamic monitoring of the TEM's technical condition. Using IoT-based sensors, the system analyzes data received from the TEM, makes necessary adjustments, and assesses the motor's technical condition. This decision-making process allows for the prediction and early detection of both the motor's lifespan and potential future failures. Consequently, traditional maintenance practices for TEMs will transition to condition-based maintenance. This approach will enhance the continuity of passenger and cargo transportation, improve the reliability and stability of the overall traction vehicle, and ensure economic viability.

#### LIST OF REFERENCE LINKS

- Demirci M., Gozde H., Taplamacioglu M. C. Fault diagnosis of power transformers with machine learning methods using traditional methods data. *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE)*. 2021. Vol. 13. Iss. 49. P. 225–230.
- Dineva A., Mosavi A., Gyimesi M., Vajda I., Nabipour N., Rabczuk T. Fault Diagnosis of Rotating Electrical Machines Using Multi-Label Classification. *Applied Sciences*. 2019. Iss. 9, No. 23. P. 50–86. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9235086>
- Gangsar P., Tiwari R. Comparative investigation of vibration and current monitoring for prediction of mechanical and electrical faults in induction motor based on multiclass-support vector machine algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Vol. 94. P. 464–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.03.016>
- Guliyev H. B., Manafov E. K., Huseynov F. H. Traction electric motor condition monitoring based on machine learning and the Internet of Things. *The 20th International Conference on «Technical and Physical Problems of Engineering» (ICTPE-2024)*. 2024. P. 47–52.
- Halder S., Bhat S., Zychma D., Sowa P. Broken rotor bar fault diagnosis techniques based on motor current signature analysis for induction motor-A review. *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 22. P. 8569. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15228569>
- Jha R. K., Swami P. D. Fault diagnosis and severity analysis of rolling bearings using vibration image texture enhancement and multiclass support vector machines. *Applied Acoustics*. 2021. Vol. 182. P. 108243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108243>
- Jigyasu R., Sharma A., Mathew L., Chatterji S. A Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Methods for Induction Motor. *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*. 2018. P. 1713–1721. DOI: <https://doi.org/10.1109/iccons.2018.8662833>
- Kumar P., Hati A. S. Review on Machine Learning Algorithm Based Fault Detection in Induction Motors. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 28. Iss. 3. P. 1929–1940. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09446-w>
- Kumar R. R., Andriollo M., Cirrincione G., Cirrincione M., Tortella A., A comprehensive review of conventional and intelligence-based approaches for the fault diagnosis and condition monitoring of induction motors. *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 23. P. 8938. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15238938>
- Kunthong J., Sapaklom T., Konghirun M., Prapanavarat C., Ayudhya P. N. N., Mujjalinvimut E., Boonjeed S. IoT-Based Traction Motor Drive Condition Monitoring in Electric Vehicles: Part 1. *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS) (Honolulu, 12–15 Dec. 2017)*. Honolulu, 2017. P. 1,184–1,188.
- Lei Y., Yang B., Jiang X., Jia F., Li N., Nandi A. K. Applications of Machine Learning to Machine Fault Diagnosis: A Review and Roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 138. P. 106587.

12. Manafov E., Huseynov F. Application of artificial neuron networks and fuzzy logic in diagnostic and forecasting the technical condition of traction motors. *PIRETC-Proceeding of The International Research Education & Training Centre*. 2023. Vol. 27. Iss. 6. P. 233–239. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.115.5>
13. Manafov E., Isgandarov I., Huseynov F. Investigating the protection system of electric motors based on its main working parameters. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 115. P. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.115.5>
14. Misra S., Kumar S., Sayyad S., Bongale A., Jadhav P., Kotecha K., Abraham A., Gabralla L. A. Fault Detection in Induction Motor Using Time Domain and Spectral Imaging-Based Transfer Learning Approach on Vibration Data. *Sensors*. 2022. Vol. 22. P. 8210. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218210>
15. Moosavian A., Ahmadi H., Tabatabaefar A., Khazaee M. Comparison of Two Classifiers; K-Nearest Neighbor and Artificial Neural Network, for Fault Diagnosis on a Main Engine Journal-Bearing. *Shock and Vibration*. 2013. Vol. 20. Iss. 2. P. 263–272. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/360236>
16. Nekrouf D., Boughanmi N. Application of root-music and SVM to induction motor faults diagnosis. *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE)*. 2023. Vol. 15. Iss. 56. P. 111–119.
17. Singh R., Bhushan B. Condition Monitoring Based Control Using Wavelets and Machine Learning for Unmanned Surface Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021. Vol. 68. Iss. 8. P. 7464–7473. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2020.3001855>
18. Tun W., Wong J. K.-W., Ling S. H. Hybrid random forest and support vector machine modeling for HVAC fault detection and diagnosis. *Sensors*. 2021. Vol. 21. Iss. 24. P. 8163. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21248163>
19. Xu Z., Li Q., Qian L., Wang M. Multi-sensor fault diagnosis based on time series in an intelligent mechanical system. *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 24. P. 9973. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22249973>
20. Zamudio-Ramírez I., Osornio-Ríos R. A., Antonino-Daviu J. A., Quijano-Lopez A. Smart-Sensor for the Automatic Detection of Electromechanical Faults in Induction Motors Based on the Transient Stray Flux Analysis. *Sensors*. 2020. Vol. 20. P. 1477. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20051477>

Е. К. МАНАФОВ<sup>1</sup>, Х. Б. ГУЛІЄВ<sup>2</sup>, Ф. Г. ГУСЕЙНОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>\*Каф. енергетики та автоматики, Національна авіаційна академія, пр. Мардакан, 30, Баку, Азербайджан, AZ1045, тел. +994 (55) 741 79 39, ел. пошта [emanafov@naa.edu.az](mailto:emanafov@naa.edu.az), ORCID 0000-0001-5697-577X

<sup>2</sup>Каф. мехатроніки, Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавіда, 25, Баку, Азербайджан, AZ1073, тел. +994 (50) 268 74 36, ел. пошта [huseyngulu@aztu.edu.az](mailto:huseyngulu@aztu.edu.az), ORCID 0009-0005-7362-0619

<sup>3</sup>Каф. електромеханіки, Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, пр. Азадлик, 34, Баку, Азербайджан, AZ1010, тел. +994 (50) 707 66 38, ел. пошта [huseynovferid17525257@gmail.com](mailto:huseynovferid17525257@gmail.com), ORCID 0000-0002-5325-0279

## Оцінка технічного стану тягових двигунів у реальному часі за допомогою технологій машинного навчання та ІоТ

**Мета.** Основною метою цього дослідження є аналіз алгоритмів машинного навчання, вибір найбільш точного й ефективного алгоритму діагностики технічного стану асинхронного тягового двигуна на основі таких робочих параметрів, як температура, рівень шуму та вібрації, а також вивчення особливостей застосування технології інтернету речей (ІоТ) для оцінки технічних умов у реальному часі. **Методика.** За допомогою аналізу та порівняльних методів визначено алгоритм машинного навчання, придатний для діагностики технічного стану асинхронного тягового двигуна. **Результати.** Проаналізовано алгоритми машинного навчання та обрано два різних алгоритми K-means та Extreme Machine Learning (EML) для діагностики технічного стану асинхронних двигунів. Алгоритми порівнювали на основі показників ефективності, таких як точність, специфічність, чутливість, позитивне прогностичне значення та негативне прогностичне значення. Результати показали, що алгоритм EML перевершив K-середні за цими показниками, досягнувши загального показника продуктивності 93 %. **Наукова новизна.** Запропоновано нову систему, яка інтегрує модель машинного навчання з технологією ІоТ для діагностики технічного стану тягових електродвигунів у реальному часі. Цей інноваційний підхід дозволяє динамічно контролювати технічний стан двигуна. **Практична значимість.** Запропонована система на основі моделі машинного навчання оцінює технічний стан тягових двигунів у реальному часі за допомогою ІоТ. Він містить рекомендації щодо того,

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

коли слід виконувати технічне обслуговування з урахуванням фактичного стану двигуна. Система дозволяє планувати технічне обслуговування на основі діагностики в реальному часі, полегшуючи перехід від планового техобслуговування до стратегій прогнозного техобслуговування. Це, у свою чергу, збільшує термін експлуатації та мінімізує незаплановані простої. Використання IoT дає можливість інтегрувати діагностичну систему із системами керування двигуном або системами SCADA, що забезпечує дистанційний моніторинг і контроль роботи двигуна.

*Ключові слова:* тяговий двигун; моніторинг технічного стану; виявлення несправностей; інтелектуальна діагностика; алгоритми машинного навчання; прогнозне обслуговування

## REFERENCE

- Demirci, M., Gozde, H., & Taplamacioglu, M. C. (2021). Fault diagnosis of power transformers with machine learning methods using traditional methods data. *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE)*, 49(13), 225-230. (in English)
- Dineva, A., Mosavi, A., Gyimesi, M., Vajda, I., Nabipour, N., & Rabczuk, T. (2019). Fault Diagnosis of Rotating Electrical Machines Using Multi-Label Classification. *Applied Sciences*, 9(23), 5086. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9235086> (in English)
- Gangsar, P., & Tiwari, R. (2017). Comparative investigation of vibration and current monitoring for prediction of mechanical and electrical faults in induction motor based on multiclass-support vector machine algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 94, 464-481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.03.016> (in English)
- Guliyev, H. B., Manafov, E. K., & Huseynov, F. H. (2024). Traction electric motor condition monitoring based on machine learning and internet of Things. *The 20th International Conference on «Technical and Physical Problems of Engineering» (ICTPE-2024)*, 47-52. (in English)
- Halder, S., Bhat, S., Zychma, D., & Sowa, P. (2022). Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor-A Review. *Energies*, 15(22), 8569. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15228569> (in English)
- Jha, R. K., & Swami, P. D. (2021). Fault diagnosis and severity analysis of rolling bearings using vibration image texture enhancement and multiclass support vector machines. *Applied Acoustics*, 182, 108243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108243> (in English)
- Jigyasu, R., Sharma, A., Mathew, L., & Chatterji, S. (2018). A Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Methods for Induction Motor. *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, 1713-1721. DOI: <https://doi.org/10.1109/iccons.2018.8662833> (in English)
- Kumar, P., & Hati, A. S. (2020). Review on Machine Learning Algorithm Based Fault Detection in Induction Motors. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 1929-1940. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09446-w> (in English)
- Kumar, R. R., Andriollo, M., Cirrincione, G., Cirrincione, M., & Tortella, A. (2022). A Comprehensive Review of Conventional and Intelligence-Based Approaches for the Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Induction Motors. *Energies*, 15(23), 8938. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15238938> (in English)
- Kunthong, J., Sapaklom, T., Konghirun, M., Prapanavarat, C., Ayudhya, P. N. N., Mujjalinvimut, E., & Boonjeed, S. (2017, Dec.). IoT-based traction motor drive condition monitoring in electric vehicles: Part 1. In *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)* (pp. 1,184-1,188). Honolulu, HI, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/peds.2017.8289143> (in English)
- Lei, Y., Yang, B., Jiang, X., Jia, F., Li, N., & Nandi, A. K. (2020). Applications of Machine Learning to Machine Fault Diagnosis: A Review and Roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, 106587. (in English)
- Manafov, E. & Huseynov, F. (2023). Application of artificial neuron networks and fuzzy logic in diagnostic and forecasting the technical condition of traction motors. *PIRETC-Proceeding of The International Research Education & Training Centre*, 27(06), 233-239. DOI: <https://doi.org/10.36962/piretc27062023-233> (in English)
- Manafov, E., Isgandarov, I., & Huseynov, F. (2022). Investigating the protection system of electric motors based on its main working parameters. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 115, 63-74. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.115.5> (in English)
- Misra, S., Kumar, S., Sayyad, S., Bongale, A., Jadhav, P., Kotecha, K., Abraham, A., & Gabralla, L. A. (2022). Fault Detection in Induction Motor Using Time Domain and Spectral Imaging-Based Transfer Learning Approach on Vibration Data. *Sensors*, 22(21), 8210. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218210> (in English)

15. Moosavian, A., Ahmadi, H., Tabatabaeefar, A., & Khazaei, M. (2013). Comparison of Two Classifiers; K-Nearest Neighbor and Artificial Neural Network, for Fault Diagnosis on a Main Engine Journal-Bearing. *Shock and Vibration*, 20(2), 263-272. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/360236> (in English)
16. Nekrouf, D., & Boughanmi N. (2023). Application of root-music and SVM to induction motor faults diagnosis. *International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering» (IJTPE)*, 15(56), 111-119. (in English)
17. Singh, R., & Bhushan, B. (2021). Condition Monitoring Based Control Using Wavelets and Machine Learning for Unmanned Surface Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(8), 7464-7473. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2020.3001855> (in English)
18. Tun, W., Wong, J. K.-W., & Ling, S.-H. (2021). Hybrid Random Forest and Support Vector Machine Modeling for HVAC Fault Detection and Diagnosis. *Sensors*, 21(24), 8163. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21248163> (in English)
19. Xu, Z., Li, Q., Qian, L., & Wang, M. (2022). Multi-Sensor Fault Diagnosis Based on Time Series in an Intelligent Mechanical System. *Sensors*, 22(24), 9973. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22249973> (in English)
20. Zamudio-Ramírez, I., Osornio-Ríos, R. A., Antonino-Daviu, J. A., & Quijano-Lopez, A. (2020). Smart-Sensor for the Automatic Detection of Electromechanical Faults in Induction Motors Based on the Transient Stray Flux Analysis. *Sensors*, 20(5), 1477. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20051477> (in English)

Надійшла до редколегії: 18.02.2025

Прийнята до друку: 20.06.2025

**УДК 629.4.072.17:621.318-047.44**

А. М. МУХА<sup>1\*</sup>, С. В. ПЛАКСІН<sup>2\*</sup>, Д. В. УСТИМЕНКО<sup>3,4\*</sup>, Ю. В. ШКІЛЬ<sup>5\*</sup>,  
О. В. КІТАЄВ<sup>6\*</sup>, А. П. АНТОНЮК<sup>7\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

<sup>2\*</sup>Відділ систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

<sup>3\*</sup>Відділ систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

<sup>4\*</sup>Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

<sup>5\*</sup>Відділ систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта siv@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-8684-5906

<sup>6\*</sup>Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта doctus@ukr.net, ORCID 0009-0000-6421-8269

<sup>7\*</sup>Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта radioprovodnik@gmail.com, ORCID 0009-0004-9101-1537

## Аналіз передумов до створення дворезимного тягово-левітаційного модуля другого покоління

**Мета.** Робота спрямована на формування концепції дворезимного тягово-левітаційного модуля як базового елемента ефективної системи синхронізованого управління рухом і підвісом магнітоплана та аналіз передумов до його створення. **Методика.** Вивчено особливості функціонування та управління основними підсистемами наявного магнітолевітаційного транспорту, їх інженерні рішення в частині лінійного тягового електроприводу та магнітного підвішування. Використано теорії та методики електричної тяги, електричних машин, електротехніки, електроніки для модифікації структури та параметрів тягового лінійного приводу, системи магнітного підвішування та способів управління тягово-левітаційною системою магнітоплана. **Результати.** Поточна реалізація магнітолевітаційних транспортних систем являє собою поетапно модернізовані класичні підходи, які були доступні ще в кінці минулого сторіччя. Водночас прогрес у відновлювальній енергетиці, мікроелектроніці, низькотемпературній техніці, радіонавігації створив підґрунтя для розробки наступного покоління магнітолевітаційного транспорту, основою якого є базовий дворезимний тягово-левітаційний модуль з енергозабезпеченням від фотоелектричних перетворювачів. Показано, що поліпшення магнітолевітаційної технології можливо досягнути шляхом сутнісної інтеграції та взаємоузгодженої комбінації двох способів створення магнітної левітації – електромагнітної (EMS) та електродинамічної (EDS) – завдяки використанню принципово іншої архітектури побудови Maglev-траси – не з довгих секцій із трифазними силовими обмотками, а з дискретних модулів, які здатні виконувати задачі створення рушійної сили (режим тяги) та магнітної підвіски, причому у всьому діапазоні доступних швидкостей. Аналіз доступних сьогодні технологій дає впевненість, що створення дворезимного тягово-левітаційного модуля, як і відповідної системи управління рухом потяга, є цілком розв'язуваною задачею. **Наукова новизна.** Отримані результати дозволяють підвести наукове підґрунтя для розвитку та вдосконалення процесу створення ефективного та конкурентоспроможного магнітолевітаційного наземного транспорту наступного покоління. **Практична значимість.** Побудова Maglev-транспортної системи з використанням типових дворезимних тягово-левітаційних модулів гібридного типу дозволить, по-перше, суттєво поліпшити енергетичні показники такого виду транспорту за рахунок локального розміщення фотоелектричних перетворювачів і модулів, що дасть скорочення втрат на передачу енергії, а також використання відновних джерел енергії (фотоелектрична

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

розподілена енергосистема), по-друге, спростити конструкцію шляхової структури за рахунок інтеграції функцій створення левітації та тяги в одному вузлі, а по-третє, зменшити капітальні та експлуатаційні витрати шляхом використання уніфікованого базового модуля.

*Ключові слова:* магнітоплан; лінійний двигун; маглев; надпровідний магніт; левітація; тягово-левітаційний модуль; нуль-потоківий контур

### Вступ

Останнім часом у розвинених країнах світу значне поширення отримали високошвидкісні залізниці для переміщення спеціалізованого рухомого складу з високими швидкостями до 400 км/год із заданим рівнем безпеки і комфорту. У провідних країнах світу, зокрема Китаї, Німеччині, США, Японії та Південній Кореї, проводять інтенсивні розробки зі створення транспорту наступного покоління на основі магнітної левітації, що спроможний рухатися над поверхнею землі зі швидкостями 350...800 км/год [1, 8, 16].

Магістральний магнітолевітаційний транспорт не є ані залізничним транспортом, ані авіаційним, хоча за своєю суттю це апарат, що низько літає, і використовує, на відміну від літака, позитивну аеродинамічну інтерференцію (ефект екраноплана) та електродинамічну інтерференцію (ефект магнітної левітації на основі застосування надпровідних пристроїв) транспортного засобу й опорної поверхні напрямного шляху. На сьогодні існує низка експериментальних установок і масштабних систем, наприклад, дослідницька лінія Transrapid (Німеччина), експериментальний полігон JR-maglev у префектурі Яманаші (Японія), корейський UTM, японський HSST, проект надшвидкісної пасажирської лінії Hyperloop у США. У рамках цих проєктів вивчають та вдосконалюють магнітолевітаційну (Maglev) технологію, яка має потенціал стати більш безпечним, економічним та екологічним видом транспорту порівняно з нині наявними.

Для того щоб зробити конкурентоспроможною магнітолевітаційну технологію, перш за все потрібно подолати проблему її енергоефективності, яку можливо вирішити шляхом глибокої інтеграції в Maglev-транспорт інтелектуальних енергосистем на основі сонячної та вітрової енергії [2].

### Мета

Основна мета цієї роботи – закласти наукове підґрунтя для створення базового шляхового модуля наступного покоління, який може забезпечити комбінований режим роботи – режим

тяги та режим левітації на всіх етапах руху магнітоплана, та мати поліпшену енергоефективність.

### Методика

Maglev-транспорт у своїй структурі має чотири основні підсистеми:

- підвіску, яка забезпечує магнітну левітацію транспортного засобу над трасою;
- привід у вигляді лінійного електродвигуна, який забезпечує переміщення потяга з одного місця в інше;
- підсистему управління рухом магнітоплана;
- підсистему, що забезпечує живлення як бортових систем транспортного засобу, так і шляхової інфраструктури.

У технічному плані магнітну левітацію класифікують на електромагнітну підвіску (EMS) [13, 17] та електродинамічну підвіску (EDS) [6, 9].

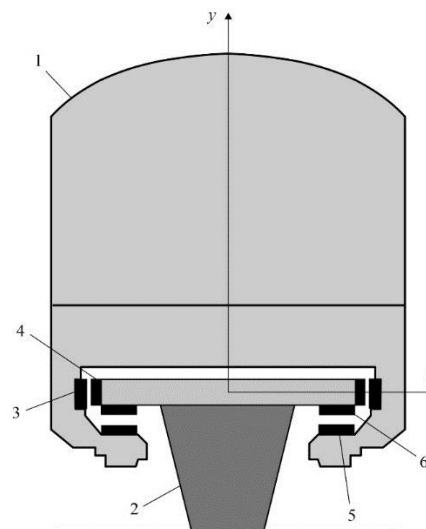


Рис. 1. Електромагнітна підвіска з розділеною левітацією та управлінням:

1 – транспортний засіб; 2 – опора траси; 3 – електромагніти бічної стабілізації (по осі  $x$ ); 4 – реакційна рейка; 5 – опорний електромагніт; 6 – пакет «довгого» статора

Fig. 1. Electromagnetic suspension with separate levitation and control:

1 – vehicle; 2 – track support; 3 – lateral stabilization electromagnets (along the  $x$ -axis); 4 – reaction rail; 5 – support electromagnet; 6 – «long» stator package

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

У системах з електромагнітною підвіскою левітація реалізується на основі сили магнітного притягання між напрямною та електромагнітами, як показано на рис. 1. Такий спосіб підвищення транспортного засобу за своєю суттю є нестабільним через характеристики магнітного кола [11] і потребує постійного і точного контролю за рівномірністю повітряного зазору. У системах з EMS величина повітряного зазору складає близько 10 мм, а тому на високих швидкостях реалізація такого контролю стає досить складною задачею. Водночас технічна реалізація транспортних систем на EMS простіша ніж на EDS, до того ж в електромагнітних підвісках левітація доступна у всьому діапазоні швидкостей магнітоплану (EDS у цьому плані має обмеження).

Своєю чергою системи з EMS можна розділити на два типи за реалізацією технології левітації:

– підвіска з інтегрованими левітацією та управлінням (рис. 2), реалізована в корейській UTM та японській HSST транспортних системах;

– підвіска з розділеною левітацією та управлінням (рис. 1), реалізована в німецькому Transrapid.

Варіант електромагнітної підвіски, де розділені функції створення левітації та управління положенням магнітоплану відносно шляху, добре працює на відносно високих швидкостях, але потребує більш складної системи управління з більшою кількістю контролерів. Варіант з інтегрованими левітацією та управлінням є більш простим і дешевим у реалізації, але не здатен працювати на високих швидкостях, оскільки зі збільшенням швидкості взаємний вплив підсистем левітації та управління зростає, і система перестає справлятися зі своїми задачами.

У класичному виконанні електромагнітні підвіски використовують звичайні електромагніти, але на сьогодні є всі передумови до впровадження в такий тип підвіски надпровідних електромагнітів. Високотемпературний надпровідниковий електромагніт здатен створювати значно сильніше магнітне поле порівняно зі звичайними електромагнітами, причому з відносно невеликими енергозатратами. Одним із недоліків, який ще доведеться подолати в надпровід-

них електромагнітах для успішного масового використання їх у транспортних магнітолевітаційних системах, є проблема їх охолодження.

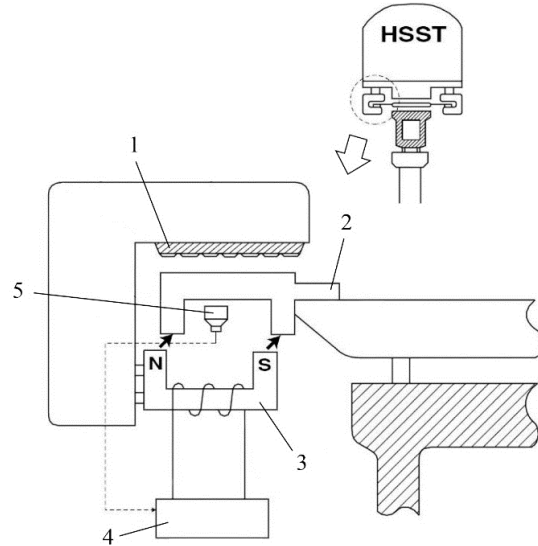


Рис. 2. Електромагнітна підвіска з інтегрованими левітацією та управлінням:

1 – котушка лінійного тягового двигуна; 2 – рейка;  
3 – левітаційний магніт; 4 – підсилювач;  
5 – датчик повітряного зазору

Fig. 2. Electromagnetic suspension with integrated levitation and control:

1 – linear traction motor coil; 2 – rail; 3 – levitation magnet;  
4 – amplifier; 5 – air gap sensor

На відміну від EMS, електродинамічна підвіска EDS використовує силу відштовхування (силу Ленца) [5, 12] і зазвичай взаємодіє з пасивною наземною частиною (котушками чи навіть простою металеву пластину) для забезпечення сили левітації і не підніметься, доки магнітоплан не досягне певної швидкості. Бортові магніти, рухаючись над шляхом, на якому знаходяться індукційні котушки чи звичайні пластини з провідникового матеріалу, наводять в останніх магнітне поле (рис. 3). Сила відштовхування, що є результатом взаємодії цих магнітних полів, піднімає магнітоплан і забезпечує йому стійку левітацію. Системи з EDS характеризуються високою магнітною стабільністю і не потребують контролю за повітряним зазором, величина якого складає в середньому 100 мм. Значна величина повітряного зазору і низька чутливість до зміни навантаження робить цей тип підвіски ефективним для високошвидкісних систем та вантажних перевезень.

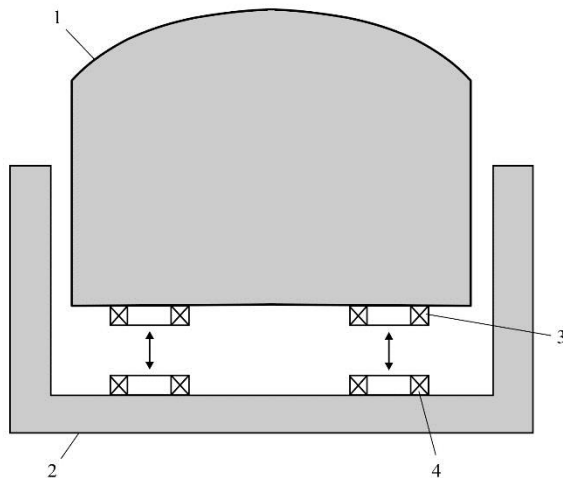


Рис. 3. Електродинамічна підвіска (EDS) з використанням надпровідникових магнітів (SC):

1 – транспортний засіб; 2 – шлях; 3 – бортові котушки намагнічування; 4 – індукційні котушки

Fig. 3. Electrodynamic suspension (EDS) using superconducting magnets (SC):

1 – vehicle; 2 – track; 3 – side magnetization coils; 4 – induction coils

Однак системи з EDS мають суттєвий недолік: щоб отримати достатній струм в індукційній котушці 4 (рис. 3), магнітоплан повинен мати швидкість не нижче 100 км/год, тільки за цієї умови сили відштовхування достатньо для надійної левітації.

За конструкцією бортового магніту електродинамічна підвіска може бути двох типів: із постійними магнітами (PM) та з надпровідниковими магнітами (SC). Системи EDS з PM прості за конструкцією і не потребують живлення, однак їх використовують для малих систем через низьку потужність. Друга група конструкцій EDS з надпровідниковими бортовими електромагнітами стала можливою з розробкою надпровідних магнітних матеріалів та створення електромагніту з достатньою напруженістю магнітного поля. Відкриття і безперервний прогрес у виготовленні куператних високотемпературних надпровідних (ВТС) матеріалів створили широкі можливості для розвитку систем EDS із SC [7, 15], а саме такі матеріали можна використовувати в умовах сильнішого магнітного поля та більшої робочої температури, що дає більшу силу левітації та зменшення вартості криогенного компонента системи. Водночас системи EDS із SC більш складні та потребують гелієвих

холодильників, що є необхідним компонентом для забезпечення роботи надпровідникового бортового електромагніту.

Найбільш перспективною вважають електродинамічну підвіску (EDS) із надпровідниковими бортовими електромагнітами (SC), саме з таким типом підвіски японський маглев установив і досі утримує світовий рекорд зі швидкості.

У нивних транспортних системах на базі маглев-технології підсистема, що створює левітацію, відокремлена від підсистеми, що забезпечує лінійний рух магнітоплана, вони працюють паралельно та синхронізуються підсистемою управління рухом.

У магнітолевітаційних транспортних системах для створення сили, що рухає транспортний засіб, застосовують лінійні тягові двигуни двох типів: лінійний асинхронний двигун (LIM) та лінійний синхронний двигун (LSM).

Принцип роботи LIM аналогічний класичному асинхронному двигуну з обертовим ротором: магнітне поле первинної частини, що змінюється в часі і просторі через повітряний зазор, індуктує електрорушійну силу у вторинній частині (котушки або звичайний лист із провідного матеріалу). Під дією цієї електрорушійної сили у вторинній частині протікає струм, який взаємодіє з магнітним потоком у повітряному зазорі і створює в такий спосіб силу (сила Лоренца), що рухає транспортний засіб. Є два типи лінійних асинхронних тягових двигунів, у яких:

- коротка первинна частина знаходиться на борту магнітоплана, а вторинна частина розміщена на напрямній шляху (SP);

- довга первинна частина знаходиться на напрямній шляху, а вторинна частина закріплена в нижній частині потяга (LP).

Перший тип двигуна (LIM SP) потребує ковзного силового контакту для передачі енергії на борт транспортного засобу, а також характеризується низькою енергоефективністю через кінцевий ефект. Серед плюсів такої конструкції – простота та відносна дешевизна вторинної частини, яка може являти собою алюмінієвий лист, укладений на напрямній шляху.

Другий тип двигуна (LIM LP) потребує значно більших капітальних затрат, оскільки на всій довжині напрямної шляху укладають котушки довгої первинної частини з відповідною ор-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ганізацією живлення. Така конструкція не потребує ковзного контакту для передачі енергії на борт магнітоплана, її можна використовувати на великих швидкостях.

Лінійний синхронний двигун (LSM) має активний індуктор, конструкція якого і визначає тип LSM, в одному випадку використовують електромагніти із залізним осердям (прикладом є німецький Transrapid), а в іншому – надпровідні магніти (японський JR-maglev типу MLX). Взаємодія між магнітним полем індуктора і струмами якоря створює рушійну силу. Залежно від розташування індуктора LSM класифікують за аналогією з LIM (SP, LP): із розміщенням індуктора на борту магнітоплана або на напрямній шляху.

Лінійні асинхронні і синхронні двигуни не потребують спеціальних сенсорних технологій для їх роботи, також вони схожі за надійністю та керованістю. У високошвидкісних маглев-системах віддають перевагу синхронним лінійним двигунам із розміщенням індуктора на борту транспортного засобу через більш високі коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності ніж в асинхронних лінійних двигунів.

Високошвидкісні транспортні маглев-системи Transrapid та JR-maglev використовують лінійні синхронні двигуни з довгим статором. Особливістю таких LSM є те, що якірна трифазна обмотка (катушки секцій) отримує живлення через шляхові вимикачі від системи трифазних фідерів із довжиною фідерної зони в діапазоні 10...40 км. Загальновідомо, що довжина ділянки, яка отримує живлення, впливає на величину споживаної двигуном потужності – зі зменшенням довжини секції обмотки якоря суттєво підвищуються енергетичні показники лінійного двигуна. Коротка секція якірної обмотки лінійного двигуна в сучасних транспортних системах реалізована не була, тому що потребувала значного підвищення вимог до надійності та швидкодії шляхових вимикачів, які на момент уведення в експлуатацію отримати було неможливо.

Оскільки магнітоплан фактично летить над напрямною шляхопроводу, то така система потребує певного зусилля в поперечному напрямку відносно напрямку руху для запобігання його бічного зсуву. Як і у випадку з підвіскою, стабілі-

зацію потяга можна здійснювати електромагнітним шляхом силами магнітного відштовхування або притягання [14].

Система шляхових котушок із нульовим потоком (NF), яка має дві котушки з компенсацією потоку, була запропонована Паулеом і Денбі [10].

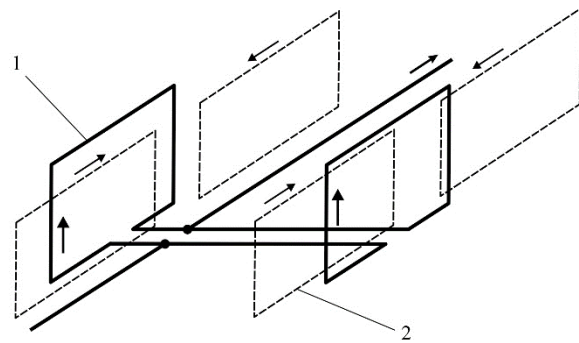


Рис. 4. Катушки тягового приводу японського JR-maglev типу MLU-002:

- 1 – катушка лінійного тягового двигуна;
- 2 – катушка надпровідникового магніту

Fig. 4. Traction drive coils of the Japanese JR-maglev type MLU-002:

- 1 – linear traction motor coil;
- 2 – superconducting magnet coil

Застосування магнітної сили відштовхування для поперечної стабілізації магнітоплана показано на рис. 4. Дві катушки лінійного тягового двигуна 1 установлені з лівого та правого боків напрямної та з'єднані між собою електрично. Катушки надпровідникового магніту 2, рухаючись повз катушки 1, наводять у кожній із них електрорушійну силу, коли транспортний засіб знаходиться по центру напрямної, повітряні зазори між ним і боковими стінками однакові, а значить, електрорушійні сили лівої і правої катушки однакові і компенсують одна одну. Якщо магнітоплан зміщується відносно напрямної у будь-який бік, електрорушійні сили стають нерівними, і під дією їх різниці виникає струм, який у катушці, до якої потяг став ближче, створює додаткову магніторушійну силу, під дією якої потяг повертається в центральне положення.

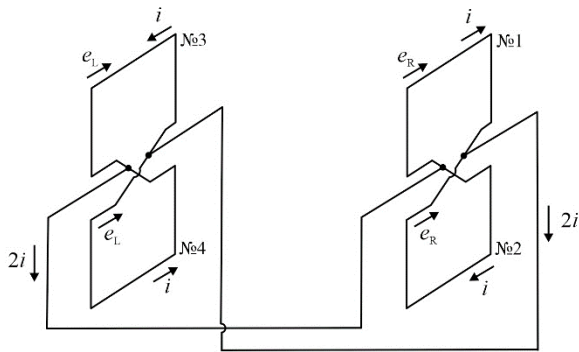


Рис. 5. Котушки левітації в японському JR-maglev типу MLX

Fig. 5. Levitation coils in the Japanese JR-maglev MLX type

Подальшим розвитком ідеї шляхових котушок із нульовим потоком є з'єднання левітаційних котушок, що вмонтовані в протилежні бокові стінки напрямної, як показано на рис. 5. У кожній із бічних стінок розміщено по дві котушки, наприклад, на лівій стінці дві вертикально розміщені котушки № 3 і 4, коли магнітна вісь надпровідникового бортового магніту знаходиться чітко між цими котушками, їх електрорушійні сили однакові. У випадку зміни вертикального положення магнітоплана рівність електрорушійних сил між котушками №3 і 4 порушується, різниця цих електрорушійних сил створює циркулювальні струми, що і становлять додаткову магніторушійну силу. Величина цієї додаткової магніторушійної сили пропорційна струму, а напрямком компенсує відхилення від заданого вертикального положення магнітоплана. Така схема увімкнення магнітолевітаційних котушок (рис. 5) забезпечує стабілізацію транспортного засобу як у поперечному напрямку, так і по висоті, тобто фактично діє як повноцінна спрямовувальна система.

На лінії Yamanashi в Японії на потягах JR-maglev типу MLX застосовують електродинамічну підвіску з надпровідниковими електромагнітами, де шляхові подвійні левітаційні котушки NF-типу розміщено в бічних стінках шляхопроводу.

Ескіз основних її частин показано на рис. 6. Пара вертикальних левітаційних котушок із нульовим потоком замкнута сама на себе, і струм утворюється лише індукцією, коли транспортний засіб проїжджає повз.

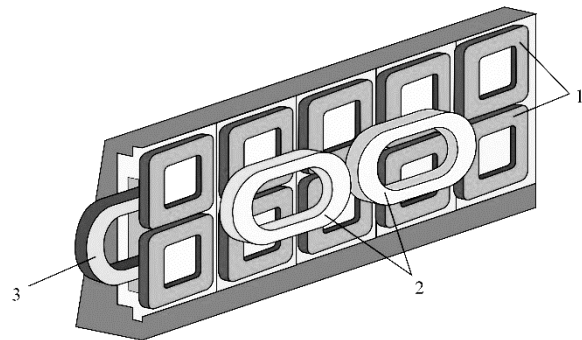


Рис. 6. Ескіз основних частин системи EDS з SC-NF (одна сторона напрямної):

- 1 – подвійна левітаційна котушка (NF);
- 2 – котушки надпровідного бортового електромагніту (SC);
- 3 – тягова котушка лінійного двигуна (LSM)

Fig. 6. Sketch of the main parts of the EDS system with SC-NF (one side of the guide):

- 1 – double levitation coil (NF);
- 2 – superconducting side electromagnet coils (SC);
- 3 – linear motor traction coil (LSM)

У поїздах Transrapid електромагніти бічної стабілізації 3 (рис. 1) закріплені з обох боків транспортного засобу, а реактивні рейки 4 (рис. 1) – на бічних стінках напрямної. Взаємодія поля електромагніту з вихровими струмами реактивної рейки дозволяє утримувати магнітоплан у центрі траси.

Використання сил магнітного притягання для стабілізації транспортного засобу суттєво ускладнене на високих швидкостях, оскільки процеси управління положенням магнітоплана в поперечному напрямку відносно напрямку руху і левітацією є взаємопов'язаними. Прикладом застосування такого підходу є транспортні системи HSST та UTM, які працюють на низьких та середніх швидкостях.

На сьогодні існує ціла низка експериментальних установок і масштабних систем на основі маглев-технології. У провідних країнах світу роботи зі створення комерційних проектів Maglev-ліній тільки інтенсифікуються, оскільки Maglev-технологія стала потужним засобом розвитку транспортної галузі та економіки в цілому [8].

## Результати

Фактично, якщо йдеться про перспективний наземний магнітолевітаційний транспорт, то для високошвидкісних систем найкращим рішенням

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

є використання електродинамічної підвіски шляхом позбавленої її суттєвого недоліку – недостатньої підйомної сили на малих швидкостях (до 100...150 км/год). Указаний недолік у проєкті JR-maglev типу MLX (Японія) подолано додаванням до конструкції магнітоплана колісних опорних систем, а на напрямній – рейок, по яких і рухається транспортний засіб на етапах розгону та гальмування. Таке рішення хоча й виконує свою функцію, є громіздким та неефективним. Значно більший інтерес представляє можливість поєднання сильних сторін обох типів підвісок EMS і EDS в одному рішенні, що можливо лише за умови принципово іншої архітектури Maglev-траси.

Базовий дворезимний тягово-левітаційний модуль повинен виконувати такі функції:

- створювати рушійне зусилля;
- забезпечувати левітацію у всьому діапазоні швидкостей магнітоплана;
- стабілізувати транспортний засіб відносно напрямної шляху.

Для реалізації вищевказаних функцій можна застосувати пару шляхових подвійних котушок NF-типу, які встановлюють навпроти в бічних стінках шляхопроводу з модифікацією їх конструкції таким чином:

- вертикально розміщені котушки кожної сторони модуля вмикаються між собою через власний швидкодійний напівпровідниковий комутаційний вузол, який забезпечує дві електричні схеми їх з'єднання. Конфігурації «0» відповідає тяговий режим, а конфігурації «8» – режим левітації [13];

– вертикальні пари котушок, що розміщені на протилежних стінках шляхопроводу, з'єднують через напівпровідниковий комутаційний вузол та утворюють нуль-потоківий контур для компенсації бокового зміщення магнітоплана;

– котушки модуля залежно від режиму роботи можуть бути активними, тобто отримувати живлення, або пасивними із замиканням на себе.

Режим левітації, коли котушки модуля утворюють конфігурацію «8» (рис. 7), має дві фази:

- за першої швидкості магнітоплану не достатньо, щоб наведені струми створили необхідну для польоту силу левітації. У цьому випадку на котушки модулів, у межах довжини магнітоплана, подають від зовнішнього джерела постійний струм, аби підняти транспортний засіб

на висоту 5...щоб мм над напрямною шляху. У міру розгону частина модулів переходить у тяговий режим, бо зростає складова сили левітації від наведеного струму<sup>4</sup>

– за другої в разі досягнення певної швидкості в тих модулях, які відповідають за створення левітації, котушки замикаються на себе, і їх живлення припиняється, тобто вони стають пасивними, а струм утворюється лише індукцією, коли транспортний засіб проїжджає повз.

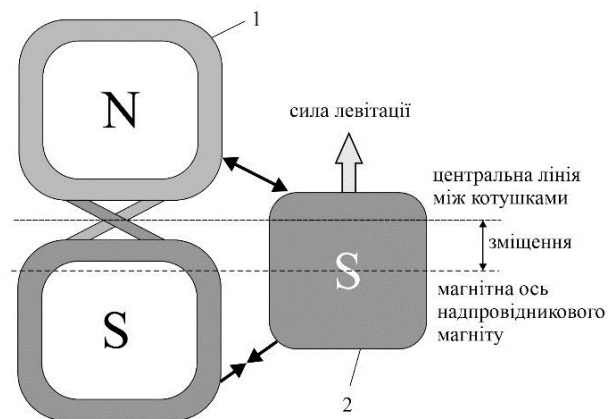


Рис. 7. Робота дворезимного тягово-левітаційного модуля в режимі левітації:

1 – подвійна котушка шляхового модуля з конфігурацією «8»; 2 – котушка надпровідного бортового електромагніту (SC)

Fig. 7. Operation of the dual-mode traction-levitation module in levitation mode:

1 – double coil of the track module with an «8» configuration; 2 – coil of the superconducting side electromagnet (SC)

Таким чином, маємо гібридний режим роботи підвіски: у діапазоні низьких швидкостей модуль реалізує електростатичний спосіб левітації, а в разі переходу до зони високих швидкостей – електродинамічний спосіб підвищення магнітоплана.

У режимі тяги котушки модуля мають конфігурацію «0» (рис. 8) та стримують змінну трифазну напругу, регульовану за амплітудою та частотою. Ця напруга формується методом широтно-імпульсної модуляції напівпровідниковим перетворювачем у складі модуля.

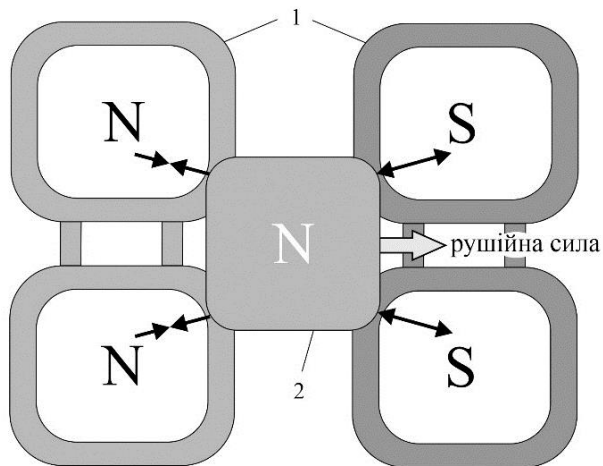


Рис. 8. Робота дворежимного тягово-левітаційного модуля в режимі тяги:

1 – подвійні котушки шляхового модуля з конфігурацією «0»;

2 – котушка надпровідного бортового електромагніту (SC)

Fig. 8. Operation of the dual-mode traction-levitation module in traction mode:

1 – double coils of the track module with configuration «0»;

2 – coil of the superconducting side electromagnet (SC)

Суттєвою відмінністю пропонованого дворежимного тягово-левітаційного модуля від наявних концепцій є те, що в активному стані перебувають тільки ті тягові модулі, у зоні дії яких знаходиться магнітоплан. Така пляма активності довжиною трохи більшою за рухомий склад рухається відносно шляхової структури зі швидкістю екіпажа.

Однак саме по собі зменшення довжини секцій лінійного синхронного тягового електродвигуна в разі традиційного способу їх живлення не вирішує задачі зменшення енергетичних втрат, оскільки фідери залишаються значної довжини та зберігають значну потужність, що проходить через них. Тільки живлення окремого модуля від власного автономного джерела енергії та з відповідною системою управління дозволить вирішити проблему енергоефективності. Таким джерелом енергії може слугувати розподілена фотоелектрична система. Перспективи застосування сонячної енергетики для живлення високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту детально проаналізовано в роботі [4].

### Наукова новизна та практична значимість

Отримані результати дозволяють підвести наукове підґрунтя для розвитку та вдосконалення процесу створення ефективного та конкурентоспроможного магнітолевітаційного наземного транспорту наступного покоління. Побудова Maglev-транспортної системи з використанням типових дворежимних тягово-левітаційних модулів гібридного типу дозволить, по-перше, уніфікувати шляхову структуру; суттєво поліпшити енергетичні показники такого виду транспорту, по-друге, спростити конструкцію шляхової структури за рахунок інтеграції функцій створення левітації та тяги в одному вузлі, а по-третє, зменшити капітальні та експлуатаційні затрати.

### Висновки

Поточна реалізація магнітолевітаційних транспортних систем являє собою поетапно модернізовані класичні підходи, які були доступні ще в кінці минулого сторіччя. Водночас прогрес у відновлювальній енергетиці, мікроелектроніці, низькотемпературній техніці, радіонавігації створив підґрунтя для розробки наступного покоління магнітолевітаційного транспорту основою якого є базовий дворежимний тягово-левітаційний модуль з енергозабезпеченням від фотоелектричних перетворювачів.

Дворежимний тягово-левітаційний модуль здатний, залежно від сигналу системи управління рухом потяга, виконувати задачі створення рушійної сили (режим тяги) і підвіски, причому у всьому діапазоні швидкостей.

Побудова Maglev-транспортної системи з використанням таких типових дворежимних тягово-левітаційних модулів гібридного типу дозволить:

- суттєво поліпшити енергетичні показники такого виду транспорту за рахунок локального розміщення фотоелектричних перетворювачів і модулів зі скороченням втрат на передачу енергії, а також використання відновних джерел енергії;

- спростити конструкцію шляхової структури за рахунок інтеграції функцій створення левітації та тяги в одному вузлі;

– зменшити капітальні та експлуатаційні витрати за рахунок використання уніфікованого базового модуля.

Аналіз доступних технологій дає впевненість, що створення дворезимного тягово-левітаційного модуля, як і відповідної системи управління рухом потяга, є цілком розв’язуваною задачею.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Геєць В. М., Волошин О. І., Дзензерський В. О., Никифорок О. І. *Розвиток економічних та науково-технічних основ транспорту п'ятого покоління*. Київ, 2020. 254 с.
2. Дзензерский В. А., Плаксин С. В., Толдаев В. Г., Шкіль Ю. В. *Интеграция магнитолевитационной магистрали и распределенной солнечной электростанции: монография*. Киев : Наукова думка, 2019. 244 с.
3. Муха А. М., Плаксин С. В., Погоріла Л. М., Устименко Д. В., Шкіль Ю. В. *Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана*. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 1 (97). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
4. Устименко Д. В. Перспективи застосування фотоелектричних систем для енергозабезпечення магнітолевітаційного високошвидкісного транспорту. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. Вип. 29. С. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2025/325476>
5. Davey K. R. Electrodynamics of Maglev coil design and analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1997. Vol. 33, No. 5. P. 4227–4229. DOI: <http://doi.org/10.1109/20.619718>
6. Fujiwara S. Characteristics of EDS magnetic levitation having ground coils for levitation arranged on the side wall. *Electrical Engineering in Japan*. 1988. Vol. 108, No. 3. P. –110. DOI: <http://doi.org/10.1002/eej.4391080312>
7. Gong T., Ma G., Cai Y., Qian H., Li J., Deng Y., Zhao Z. Calculation and optimization of propulsion force of a real-scale REBCO magnet for EDS train. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019. Vol. 29, No. 5. P. 1–6. DOI: <http://doi.org/10.1109/TASC.2019.2901564>
8. Kircher R., Palka R., Fritz E., Eiler K., Witt M., Blow L., Klühspies J. *Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail*. Germany, DC : The International Maglev Board Research Series, 2018. Vol. 2. 19 p.
9. Powell J. R., Danby G. T. Maglev vehicles-raising transportation advances of the ground. *IEEE Potentials*. 1996. Vol. 15. Iss. 4. P. 7–12. DOI: <http://doi.org/10.1109/45.539957>
10. Powell J. R., Danby G. T. *Magnetic suspension for levitated tracked vehicles*. *Cryogenics*. 1971. Vol. 11. Iss. 3. P. 192–204. DOI: [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(71\)90311-0](https://doi.org/10.1016/0011-2275(71)90311-0)
11. Riches E. Will maglev lift off? *IEE Review*. 1988. Vol. 34. Iss. 11. P. 427–430. DOI: <https://doi.org/10.1049/ir:19880177>
12. Rote D. M., Yigang Cai. *Review of dynamic stability of repulsive-force maglev suspension systems*. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002. Vol. 38, No. 2. P. 1383–1390. DOI: <http://doi.org/10.1109/20.996030>
13. Sinha P. Design of a magnetically levitated vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1984. Vol. 20. Iss. 5. P. 1672–1674. DOI: <http://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063552>
14. Wang S., Li H., Wang L., Huang H., Deng Z., Zhang W. *Suspension parameters optimization of HTS maglev under random vibration*. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021. Vol. 31. Iss. 8. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2021.3094427>
15. Weijers H.W. *High-Temperature Superconductors in High-Field Magnets*: PhD thesis. University of Twente, 2009. 195 p. DOI: <https://doi.org/10.3990/1.9789036528498>
16. Wenk M., Klühspies J., Blow L., Kircher R., Fritz E., Witt M., Hekler M. *Maglev: Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail*. The International Maglev Board, 2018. 44 p.
17. Yamamura S. *Magnetic levitation technology of tracked vehicles present status and prospects*. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1976. Vol. 12. Iss. 6. P. 874–878. DOI: <http://doi.org/10.1109/TMAG.1976.1059125>

A. M. MUKHA<sup>1\*</sup>, S. V. PLAKSIN<sup>2\*</sup>, D. V. USTYMENKO<sup>3,4\*</sup>, YU. V. SHKIL<sup>5\*</sup>,  
O. V. KITAYEV<sup>6\*</sup>, A. P. ANTONIUK<sup>7\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

<sup>2\*</sup>Dep. of control systems in vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskiy St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186.

<sup>3\*</sup>Dep. of control systems in vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskiy St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail ustymenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

<sup>4\*</sup>Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustymenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

<sup>5\*</sup>Dep. of control systems in vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskiy St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail yvs@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-8684-5906

<sup>6\*</sup>Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail doctus@ukr.net, ORCID 0009-0000-6421-8269

<sup>7\*</sup>Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail radioprovodnik@gmail.com, ORCID 0009-0004-9101-1537

## Analysis of Prerequisites for the Creation of a Second-Generation Dual-Mode Traction-Levitation Module

**Purpose.** This work aims to develop a concept for a dual-mode traction-levitation module as a basic element of an effective system for synchronized control of the motion and suspension of a maglev train and to analyse the prerequisites for its creation. **Methodology.** The features of the functioning and control of the main subsystems of the existing maglev transport, their engineering solutions in terms of linear traction electric drive and magnetic suspension were studied. Theories and methods of electric traction, electric machines, electrical engineering, and electronics were used to modify the structure and parameters of the traction linear drive, the magnetic suspension system, and the methods of controlling the traction-levitation system of the maglev. **Finding.** The current implementation of magnetic levitation transport systems represents a step-by-step modernization of classic approaches that were available at the end of the last century. At the same time, progress in renewable energy, microelectronics, low-temperature technology, and radio navigation has laid the foundation for the development of the next generation of magnetic levitation transport, based on a basic dual-mode traction-levitation module powered by photovoltaic converters. It is shown that improvements in maglev technology can be achieved through the essential integration and coordinated combination of two methods of creating magnetic levitation—electromagnetic (EMS) and electrodynamic (EDS)—thanks to the use of a fundamentally different architecture for the construction of the Maglev track—not from long sections with three-phase power coils, but with discrete modules capable of performing the tasks of creating propulsive force (traction mode) and magnetic suspension, across the entire range of available speeds. An analysis of currently available technologies gives confidence that the creation of a dual-mode traction-levitation module, as well as a corresponding train motion control system, is a completely solvable problem. **Originality.** The results obtained provide a scientific basis for the development and improvement of the process of creating an effective and competitive next-generation magnetically levitated ground transportation system. **Practical value.** Building a Maglev transport system using standard dual-mode hybrid traction-levitation modules will, first, significantly improve the energy performance of this type of transport by locally placing photovoltaic converters and modules, which will reduce energy transmission losses, as well as the use of renewable energy sources (photoelectric distributed energy system), secondly, simplify the design of the track structure by integrating the functions of levitation and traction in a single node, and thirdly, reduce capital and operating costs through the use of a unified base module.

**Keywords:** magnetoplane; linear motor; maglev; superconducting magnet; levitation; traction-levitation module; zero-flow circuit

## REFERENCES

1. Heyets, V. M., Voloshyn, O. I., Dzenzerskyi, V. O., & Nykyforuk, O. I. (2020). *Development of the economic and scientific and technological foundations of fifth generation transport*. Kyiv. (in Ukrainian)
2. Dzenzerskyi, V. O., Plaksin, S. V., Toldaev, V. G., & Shkil, Yu. V. (2019). *Ergaticheskie modeli sortirovochnykh Integratsiya magnitolevitatsionnoy magistrali i raspredelennoy solnechnoy elektrostantsii: monografiya*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
3. Mukha, A. M., Plaksin, S. V., Pohorila, L. M., Ustymenko, D. V., & Shkil, Y. V. (2022). Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension. *Science and Transport Progress*, 1(97), 23-31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332> (in Ukrainian)
4. Ustymenko, D. (2025). Prospects of application of photoelectric systems for energy supply of magnetolevitation high-speed transport. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 29, 66-71. DOI: <https://doi.org/10.15802/tsst2025/325476> (in Ukrainian)
5. Davey, K. R. (1997). Electrodynamic Maglev coil design and analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 33(5), 4227-4229. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.619718> (in English)
6. Fujiwara, S. (1988). Characteristics of EDS magnetic levitation with ground coils for levitation arranged on the side wall. *Electrical Engineering in Japan*, 108(3), 101-110. DOI: <https://doi.org/10.1002/ej.4391080312> (in English)
7. Gong, T., Ma, G., Cai, Y., Qian, H., Li, J., Deng, Y., & Zhao, Z. (2019). Calculation and Optimization of Propulsion Force of a Real-Scale REBCO Magnet for EDS Train. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(5), 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2019.2901564> (in English)
8. Kircher, R., Palka, R., Fritz, E., Eiler, K., Witt, M., Blow, L. & Klühspies, J. (2018). *Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail* (Vol. 2) Germany, DC: The International Maglev Board. Research Series. (in English)
9. Powell, J. R., & Danby, G. T. (1996). Maglev vehicles-raising transportation advances of the ground. *IEEE Potentials*, 15(4), 7-12. DOI: <https://doi.org/10.1109/45.539957> (in English)
10. Powell, J. R., & Danby, G. T. (1971). Magnetic suspension for levitated tracked vehicles. *Cryogenics*, 11(3), 192-204. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(71\)90311-0](https://doi.org/10.1016/0011-2275(71)90311-0) (in English)
11. Riches, E. (1988). Will maglev lift off? *IEE Review*, 34(11), 427-430. DOI: <https://doi.org/10.1049/ir:19880177> (in English)
12. Rote, D. M., & Yigang Cai. (2002). Review of dynamic stability of repulsive-force maglev suspension systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(2), 1383-1390. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.996030> (in English)
13. Sinha, P. (1984). Design of a magnetically levitated vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*, 20(5), 1672-1674. <https://doi.org/10.1109/tmag.1984.1063552> (in English)
14. Wang, S., Li, H., Wang, L., Huang, H., Deng, Z., & Zhang, W. (2021). Suspension Parameters Optimization of HTS Maglev Under Random Vibration. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(8), 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2021.3094427> (in English)
15. Weijers, H. W. (2009). High-Temperature Superconductors in High-Field Magnets (PhD thesis). University of Twente. (in English)
16. Wenk, M., Klühspies, J., Blow, L., Kircher, R., Fritz, E., Witt, M., & Hekler, M. (2018). *Maglev: Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail*. The International Maglev Board. (in English)
17. Yamamura, S. (1976). Magnetic levitation technology of tracked vehicles present status and prospects. *IEEE Transactions on Magnetics*, 12(6), 874-878. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.1976.1059125> (in English)

Надійшла до редколегії: 17.02.2025

Прийнята до друку: 20.06.2025

# ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК [629.424:62-585]-047.37

Б. Є. БОДНАР<sup>1\*</sup>, О. Б. ОЧКАСОВ<sup>2\*</sup>, Є. Б. БОДНАР<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. + 38 (056) 733 19 01, ел. пошта b.e.bodnar@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

<sup>2\*</sup>Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта o.b.ochkasov@ust.edu.ua ORCID 0000-0002-7719-7214

<sup>3\*</sup>Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. + 38 (056) 733 19 61, ел. пошта e.b.bodnar @ ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6040-913X

## Комплексне діагностування тепловозів з гідروпередачею: підходи та методи

**Мета.** Основною метою цієї статті є визначення узагальненого показника енергоефективності робочого циклу дизельного двигуна, який враховує комплексний вплив термодинамічних, механічних і гідродинамічних втрат, що виникають у процесі його експлуатації. Запропонований показник дозволяє оцінити зміни в роботі дизеля, зумовлені зниженням його теплової ефективності через погіршення процесу згоряння паливної суміші, зростанням механічних втрат, спричинених поступовим зношуванням деталей, а також появою додаткових несправностей у його системах і вузлах, що впливають на загальну працездатність двигуна. **Методика.** Для досягнення поставленої мети за результатами експериментальних досліджень запропоновано методику визначення ефективної потужності дизелів тепловозів ТГМ4 та ТГМ6–А з гідравлічною передачею УГП750–1200ПР, яка є інтегральним показником, що характеризує їх технічний стан та дозволяє оцінити якість виконання ремонту. **Результати.** На основі проведених експериментальних досліджень розроблено метод визначення ефективної потужності дизелів тепловозів із гідравлічною передачею УГП750–1200ПР під час короткочасного навантаження пусковим гідротрансформатором у режимі «вибігу» турбінного колеса. Метод базується на вимірюванні частоти обертання колінчастого вала дизеля та тиску наддувного повітря. Обробка експериментальних даних дозволила запропонувати методику оцінки ефективної потужності дизеля як інтегрального показника його технічного стану. Ця методика дає змогу визначати якість ремонту тепловозів ТГМ4 і ТГМ6–А з гідравлічною передачею УГП750–1200ПР, виявляти приховані несправності, оцінювати загальний технічний стан дизеля без розбирання, а також визначати необхідність ремонту або регулювання параметрів. **Наукова новизна.** У роботі отримали подальший розвиток методи діагностування силових установок тепловозів із гідравлічною передачею та визначення діагностичних параметрів, що характеризують їх технічний стан. **Практична значимість.** Використання запропонованої методики визначення ефективної потужності силових установок тепловозів із гідравлічною передачею УГП750–1200ПР дозволяє виявляти приховані несправності, оцінювати загальний технічний стан дизеля без його розбирання та визначати потребу в ремонті або регулюванні параметрів.

**Ключові слова:** тепловоз; гідравлічна передача; дизельний двигун; ефективна потужність; комплексне діагностування; технічний стан; післяремонтні випробування; ТГМ4; ТГМ6–А

### Вступ

Тепловози з гідропередачею відіграють ключову роль у залізничних перевезеннях, забезпечуючи ефективність та безперервність виконання робіт. Їх важливість полягає у здатності

надійно працювати в складних умовах, особливо на промислових маршрутах, де потрібна висока потужність та адаптивність до змінних умов експлуатації. Однак особливості конструкції тепловозів із гідравлічною передачею створюють додаткові виклики в забезпеченні надійної експлу-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

атації та своєчасного їх обслуговування. Традиційні методи діагностування силової установки тепловозів часто неможливо використати для тепловозів із гідравлічною передачею.

У сучасних умовах розвиток новітніх технологій дозволяє впроваджувати більш точні та інтегровані підходи до діагностування. Комплексне діагностування тепловозів із гідропередачею, що поєднує методи моніторингу технічного стану, аналізу параметрів роботи та прогнозування можливих відмов, стає ключовим фактором у підвищенні ефективності та надійності залізничного транспорту.

Окремою задачею є проведення післяремонтних випробувань тепловозів. Актуальність проведення випробувань тепловозів із гідропередачею після ремонту обумовлюється кількома ключовими факторами: безпека експлуатації, підтримка ефективності роботи, зменшення ризику повторних відмов, виконання нормативних вимог та економічна доцільність. У багатьох країнах випробування тепловозів після ремонту є обов'язковим етапом, передбаченим галузевими нормативами. Це дозволяє підтвердити їх відповідність технічним умовам та готовність до експлуатації.

### Мета

Основною метою статті є визначення узагальненого показника енергоефективності робочого циклу дизельного двигуна, що враховує сукупний вплив термодинамічних, механічних і гідродинамічних втрат. Зміни цього показника відображають зниження теплової ефективності дизеля через погіршення процесу згоряння, зростання механічних втрат унаслідок зношування, а також появу інших несправностей у системах і вузлах дизеля.

### Методика

Проведемо огляд методів випробувань силових установок дизелів тепловозів.

Інноваційні методи безрозбірного діагностування дизелів забезпечують не лише виявлення несправностей, а й їхнє своєчасне попередження, що дозволяє уникнути демонтажу чи повного розбирання дизеля, суттєво скорочуючи витрати часу та ресурсів. Сучасні методи

безрозбірного діагностування поділяють на тестові, які потребують тимчасового виведення двигуна з експлуатації, та функціональні, що дозволяють здійснювати моніторинг технічного стану дизеля без його вилучення з експлуатації. Функціональні методи забезпечують точне визначення поточного технічного стану дизеля, оцінку ступеня зношування критичних вузлів, а також встановлення необхідності проведення ремонтних заходів. Вони передбачають індивідуальне відстеження стану кожного конкретного двигуна протягом усього періоду його експлуатації.

Методика безрозбірного діагностування дизельних двигунів розвивається в різних напрямках, зокрема у сферах віброакустичного аналізу та діагностики за нерівномірністю обертання колінчастого вала. Кожен із цих підходів спрямований на підвищення точності та ефективності виявлення несправностей і контролю за технічним станом двигуна.

Віброакустична діагностика базується на аналізі вібраційних та акустичних сигналів, генерованих двигуном і його компонентами під час експлуатації. Зміни в технічному стані деталей двигуна, такі як зношування, люфти, тріщини або неправильне регулювання, викликають зміни у віброакустичних сигналах. Аналіз цих сигналів дозволяє ідентифікувати дефекти та прогнозувати можливі відмови.

У роботі [15] запропоновано використовувати вібраційні сигнали для виявлення пропусків запалювання в циліндрах. Визначення параметрів робочого циклу кожного циліндра дозволяє здійснювати корекцію та налаштування для забезпечення ефективної роботи двигуна, рівномірного розподілу навантаження між циліндрами, а також раннього виявлення потенційно небезпечних тенденцій у розвитку несправностей.

У дослідженнях [4, 17] запропоновано використовувати вібраційні сигнали для діагностики паливних форсунок і клапанного механізму за допомогою магнітних вібраційних датчиків. Випробування цих методів проведено на корабельному дизелі MAN 6S60MC–C, що дозволило підтвердити їхню ефективність у виявленні дефектів та оптимізації роботи двигуна.

Метод визначення механічних дефектів дизельного двигуна на основі аналізу шумових па-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

раметрів запропоновано в [7]. Цей підхід дозволяє здійснювати моніторинг технічного стану двигуна і формувати інформацію про залишковий ресурс агрегату на основі отриманих даних. Дослідження підкреслюють, що обробка та візуалізація акустичних сигналів у вигляді топологічних 3D–моделей може значно підвищити ефективність методів дистанційного моніторингу та забезпечити своєчасне виявлення потенційних відмов і несправностей.

У статті [18] проаналізовано сучасні методи діагностики суднових дизельних двигунів та запропоновано підходи на основі нейронних мереж для виявлення множинних несправностей. Традиційні методи, такі як аналіз мастила, вібраційний і тепловий аналіз, мають обмеження через високу вартість обладнання, складність монтажу та чутливість до зовнішніх факторів. Натомість автори пропонують використання штучного інтелекту для підвищення точності та ефективності діагностики. У дослідженні застосовано три алгоритми нейронних мереж: LM–BP, BR–BP та PNN. Найкращі результати для множинних несправностей досягнуто за допомогою LM–BP (88,89 % точності) з мінімальним часом обробки. BR–BP забезпечила стовідсоткову точність для одиничних несправностей, але була менш ефективною для множинних (55,56 %). PNN продемонструвала найшвидшу діагностику, однак мала найнижчу точність. Отримані результати демонструють перспективність нейронних мереж для поліпшення діагностики дизельних двигунів.

Гідравлічні передачі є поширеними як на автомобільному, так і на залізничному транспорті. Більшість методів випробування гідравлічних передач є стендовими. Завдання стендових випробувань полягає у визначенні технічного стану передачі та контролі відповідності стану передачі паспортним даним.

Робота [11] присвячена методам випробування та контролю гідромеханічної безступеневої трансмісії з використанням багатofункціонального стенда. Основну увагу приділено розробці стенда, який дозволяє виконувати багаторівневе тестування складових гідромеханічної безступеневої трансмісії. У рамках дослідження протестовано як механічну, так і гідравлічну складу системи, що дозволяє окремо оцінювати їхні характеристики, а також взаємодію між

ними. Тестовий стенд містить систему контролю навантаження та датчики для вимірювання швидкості, крутного моменту й тиску, що дає змогу оцінювати продуктивність гідропередачі у реальних умовах експлуатації. Запропонована багаторівнева методика тестування допомагає виявляти та усувати недоліки на ранніх етапах розробки, що скорочує цикл створення передачі та знижує витрати.

У статті [13] розглянуто метод динамічного співвідношення потужності для колісних навантажувачів на основі системи гідродинамічної трансмісії з реверсом потужності. Запропонований метод оптимізує передачу потужності, адаптуючи передавальне число відповідно до змінних робочих умов, що підвищує ефективність роботи навантажувача. Дослідження показало, що динамічне співвідношення потужності збільшує тягове зусилля, поліпшує ефективність трансмісії та знижує витрати пального.

Відсутність можливостей проведення післяремонтних випробувань тепловозів із гідравлічною передачею з навантаженням дизеля, через особливості конструкції призводить до того, що під час експлуатації дизелі можуть мати різний ступінь розрегулювання і, як правило, незадовільний перебіг робочого процесу. Крім цього, на техніко-економічні показники роботи дизеля суттєво впливає неузгодженість його характеристик та гідропередачі. Особливо така ситуація виникає після проведення капітальних ремонтів дизеля і гідропередачі. Це призводить до збільшення витрати дизельного палива, зниження надійності дизеля і тепловоза в цілому [8, 10].

Проведення випробувань тепловозів із гідравлічною передачею після ремонту забезпечує високу якість, безпеку та економічність експлуатації, що робить цю процедуру критично важливою для залізничного транспорту [3].

Багаторічний досвід експлуатації маневрових тепловозів із гідравлічною передачею потужності показує, що для оцінки технічного стану дизелів у процесі їх експлуатації, а також оцінки якості технічного обслуговування та ремонту тепловозів необхідно застосовувати комплексний діагностичний параметр, основу якого становить ефективна потужність дизеля [3, 6]. Разом з тим вимірювання ефективної потужності дизеля тепловоза з гідравлічною передачею є складним технічним завданням, яке було вирішене фахівцями

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

кафедри «Локомотиви» ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» [1, 2, 5].

На підставі проведених співробітниками кафедри «Локомотиви» ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» досліджень тепловозів ТГМ4 та ТГМ6А, які передбачали експериментальні перевірки та аналіз характеристик силової установки, розроблено спосіб проведення післяремонтних діагностичних випробувань тепловозів із гідравлічною передачею в умовах експлуатації [6, 12, 19]. З метою дослідження проявів несправностей для різних технічних станів дизеля та гідравлічної передачі використано імітаційне комп'ютерне моделювання [5, 11].

Оскільки розробка способів вимірювання ефективної потужності дизеля на тепловозах із гідравлічною передачею є актуальною, запропоновано метод, суть якого полягає у визначенні ефективної потужності за вимірююю частотою обертання колінчастого вала та абсолютним тиском наддуву повітря в циліндри дизеля. Під час проведення цих випробувань навантаження дизеля здійснено гідропередачею за її роботи на пусковому гідротрансформаторі в режимі «вибігу» турбінного колеса. Такий режим навантаження дозволив провести вимірювання максимального та середнього за часом ефективного тиску, запису індикаторної діаграми робочого процесу в циліндрах дизеля, тиску наддувного повітря, інших параметрів роботи силової установки та допоміжного обладнання тепловозів. На підставі експериментальних даних та аналізу параметрів роботи силової установки в такому режимі розроблено спеціальний метод визначення ефективної потужності дизеля в умовах експлуатації. Ефективна потужність є комплексним діагностичним параметром, оскільки інтегрує вплив різних систем і компонентів двигуна, а її зміна може вказувати на широкий спектр можливих несправностей.

### Результати

Під час розробки методу визначення ефективної потужності дизеля тепловоза з гідравлічною передачею на підставі отриманих у процесі випробувань тепловозів значень на всіх позиціях контролера машиніста, частоти обертання колінчастого вала дизеля ( $n_d$ ) та абсолютного тиску

Метод вузлових точок використовують для опису багатовимірної поверхні результативних ознак. Багатовимірну поверхню результативної ознаки  $Y$  складної систему описують у мультиплікативному вигляді [8, 9, 16]:

$$Y = \frac{1}{y_0^{n-1}} \prod_{i=1}^n f_i(x_i), \quad (1)$$

де  $Y$  – сукупність результативних ознак;  $f_i(x_i)$  – однопараметричні функції.

Задача побудови результативної функції на ділянці визначення замінюється визначенням її у зоні «вузлової точки». При цьому розподіл похибок на ділянці визначення є невизначеним. Коефіцієнт, що знаходиться перед добутком функцій, визначають величиною функції у вузловій точці [16].

Для проведення досліджень, за результатами пасивного експерименту отримано трифакторну модель типу:

$$y = \frac{1}{y_0^2} (a_1 + b_1 x_1 + c_1 x_1^2) \cdot (a_2 + b_2 x_2 + c_2 x_2^2) \cdot (a_3 + b_3 x_3 + c_3 x_3^2). \quad (2)$$

Статистичний масив експериментальних даних має  $m$  точок. Вихідні  $y_i$  та наведені  $y_{ij}$  статистичні масиви подамо у формі табл. 1.

Таблиця 1

#### Загальний вигляд масиву експериментальних даних

Table 1

#### General view of the experimental data set

$y_i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_{nj}$
$y_1$	$x_{1,1}$	$x_{2,1}$	$x_{3,1}$	$y_{n1}$
...	...	...	...	...
$y_m$	$x_{1,m}$	$x_{2,m}$	$x_{3,m}$	$y_{nm}$

Суть методу полягає в розрахунку ефективної потужності дизеля тепловоза з гідравлічною передачею на підставі отриманих у процесі випробувань тепловозів значень на всіх позиціях контролера машиніста, частоти обертання колінчастого вала дизеля ( $n_d$ ) та абсолютного тиску

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

наддуваного повітря ( $P_{int}$ ). для визначення ефективної потужності побудуємо граф параметрів робочого процесу дизеля (рис.1).

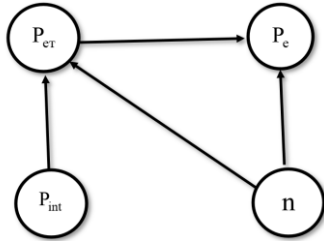


Рис. 1. Орієнтований граф параметрів робочого процесу дизеля:

$P_{int}$  – тиск наддуваного повітря;  
 $(n)$  – частота обертання колінчастого валу дизеля;  
 $P_{em}$  – середній ефективний тиск в циліндрах дизеля;  
 $P_e$  – ефективна потужність дизеля

Fig. 1. Oriented graph of diesel engine operating process parameters:

$P_{int}$  – inflatable air pressure;  
 $(n)$  – diesel crankshaft rotation frequency;  
 $P_{em}$  – average effective pressure in diesel cylinders;  
 $P_e$  – effective diesel power

Відповідно до наведеного на рис. 1 графа середній ефективний тиск повітря в циліндрах дизеля визначаємо на підставі наступного функціонального зв'язку:

$$P_{em} = P_{em.o} \cdot \bar{f}_{P_{em}}(P_{int}) \cdot \bar{f}_{P_{em}}(n) \quad (3)$$

де  $P_{em.o}$  – значення середнього ефективного тиску у вузловій точці;  $\bar{f}_{P_{em}}(P_{int})$  – відносна функціональна характеристика впливу  $P_{int}$  на  $P_{em}$ ;  $\bar{f}_{P_{em}}(n)$  – відносна функціональна характеристика впливу  $n$  на  $P_{em}$ .

За вузлову точку, в цій методиці візьмемо точку, у якій паспортні дані відповідних значень параметрів ( $P_{int0}$ ,  $n_0$ ,  $P_{em.o}$ ) відповідають номінальному режиму роботи дизеля. У цій вузловій точці значення відносних функціональних характеристик впливу дорівнює 1, тобто  $\bar{f}_{P_{em}}(P_{int}) = 1$ ,  $\bar{f}_{P_{em}}(n) = 1$ .

Функціональні характеристики  $\bar{f}_{P_{em}}(P_{int})$ ,  $\bar{f}_{P_{em}}(n)$  отримано за результатами обробки навантажувальних характеристик дизелів 8ЧН26/26

(тепловоз ТГМ6–А) та дизелів 6ЧН21/21 (тепловоз ТГМ4).

Значення ефективної потужності дизеля, виходячи із рис. 1, отримаємо з відомого відношення:

$$P_e = a \cdot P_{em} \cdot n. \quad (4)$$

Значення коефіцієнта  $a$ , що входить до виразу (4), визначаємо за виразом:

$$a = \frac{V_h \cdot i}{30 \cdot \tau}, \quad (5)$$

де  $V_h$  – робочий об'єм циліндра дизеля,  $m^3$ ;  $i$  – кількість циліндрів;  $\tau$  – тактність, для чотиритактного дизеля  $\tau = 4$ .

Аналитичну залежність функції  $\bar{f}_{P_{em}}(P_{int}) = 1$  визначено на підставі обробки навантажувальних характеристик дизелів 6ЧН21/21 та 8ЧН26/26 з гідропередачею УГП750–1200ПР (тепловози ТГМ4 та ТГМ6–А) за методикою, наведеною в роботі [8], а результати розрахунків подано на рис. 2.

За результатами апроксимації дослідних даних отримано аналітичне рівняння регресії:

$$\bar{P}_{em} = -2,3684 + 33,134 \cdot P_{int} - 64,703 \cdot P_{int}^2. \quad (6)$$

Відповідність багатofакторних моделей експериментальним даним за наявності повторних дослідних даних оцінено за критерієм Фішера  $F_p = 825$  та за коефіцієнтом кореляції  $r = 0,995$ , що підтверджує адекватність аналітичного рівняння регресії (6) дослідним даним.

У зв'язку з тим, що визначення потужності дизеля за такого способу випробувань та узгодження характеристик дизеля і гідропередачі проведено в номінальному режимі, рівняння (6) необхідно трансформувати на вузлову точку цього режиму. Після проведення розрахунків для номінального режиму, де тиск повітря наддуву для дизеля 6ЧН21/21  $P_{int} = 0,196$  МПа, отримаємо нове значення  $\bar{P}_{em} = 1,6402$  і, поділивши коефіцієнти рівняння на нове значення, матимемо нове рівняння:

$$\bar{P}_{em} = -1,4439 + 20,201 \cdot P_{int} - 39,448 \cdot P_{int}^2. \quad (7)$$

Рівняння (7) розкриває аналітичний вигляд функції  $\bar{f}_{P_{em}}(P_{int})$  що входить до рівняння (3).

З урахуванням символічних позначень рівняння (3) буде мати вигляд:

$$\bar{f}_{P_{em}}(P_{int}) = -1,4439 + 20,201 \cdot P_{int} - 39,448 \cdot P_{int}^2. \quad (8)$$

Узагальнену характеристику  $\bar{f}_{P_{em}}(n)$  отримано аналогічним способом. Графічну залежність розрахунків впливу частоти обертання колінчатого вала дизеля 6ЧН21/21 на відносний середній ефективний тиск газів наведено на рис. 3.

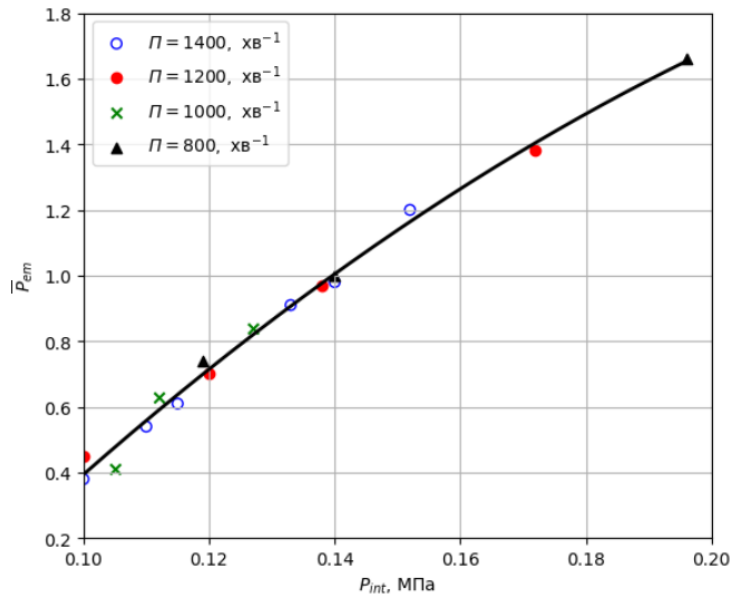


Рис. 2. Вплив тиску наддувального повітря  $P_{int}$  на відносну зміну середнього ефективного тиску в циліндрах  $P_{em}$  дизеля 6ЧН21/21

Fig. 2. Influence of charge air pressure  $P_{int}$  on the relative change in the average effective pressure in cylinders  $P_{em}$  of the 6CHN21/21 diesel engine

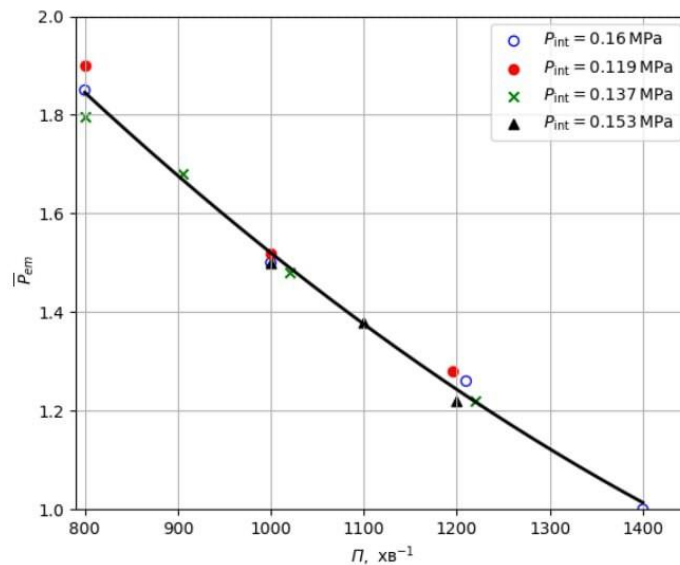


Рис. 3. Вплив частоти обертання колінчатого вала дизеля 6ЧН21/21 на відносний середній тиск газів

Fig. 3. Effect of the crankshaft speed of the 6CHN21/21 diesel engine on the relative average gas pressure

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

За результатами апроксимації експериментальних даних отримано рівняння регресії:

$$P_{em} = -3,391 - 2,306 \cdot 10^{-3} \cdot n + 4,308 \cdot 10^{-7} \cdot n^2. \quad (9)$$

З урахуванням значень тиску в вузловій точці рівняння (3) приведемо до наступного вигляду

$$P_{em} = 1.0836 \cdot (-1,4439 + 20,201 \cdot P_{int} - 39,448 \cdot P_{int}^2) \cdot (-3,391 - 2,306 \cdot 10^{-3} \cdot n + 4,308 \cdot 10^{-7} \cdot n^2). \quad (10)$$

Рівняння (10) дозволяє розраховувати значення середнього ефективного тиску в циліндрах дизеля 6ЧН21/21 в разі зміни частоти обертання колінчатого вала та тиску наддувального повітря.

Тоді з урахуванням значення коефіцієнта, визначеного за виразом (5) для дизеля 6ЧН21/21, формула для розрахунку ефективної потужності буде мати вигляд:

$$P_e = 0,3635 \cdot P_{em} \cdot n \quad (11)$$

Таким чином, вирази (10) та (11) дозволяють визначити ефективну потужність дизеля 6ЧН21/21 за відомих значень тиску наддувального повітря та частоти обертання колінчатого вала дизеля під час проведення випробувань тепловозів після поточних ремонтів в умовах експлуатації.

Ураховуючи, що для тепловоза ТГМ6–А використано такий самий метод обробки експериментальних даних, шляхом апроксимації навантажувальних характеристик дизеля 8ЧН26/26 та гідропередачі УГП750–1200ПР отримано таке аналітичне рівняння регресії:

$$\bar{P}_{em} = -1,087 + 17,749 \cdot P_{int} - 20,890 \cdot P_{int}^2 \quad (12)$$

Графічну залежність впливу тиску наддувального повітря на відносну зміну середнього ефективного тиску в циліндрах дизеля 8ЧН26/26 наведено на рис. 4.

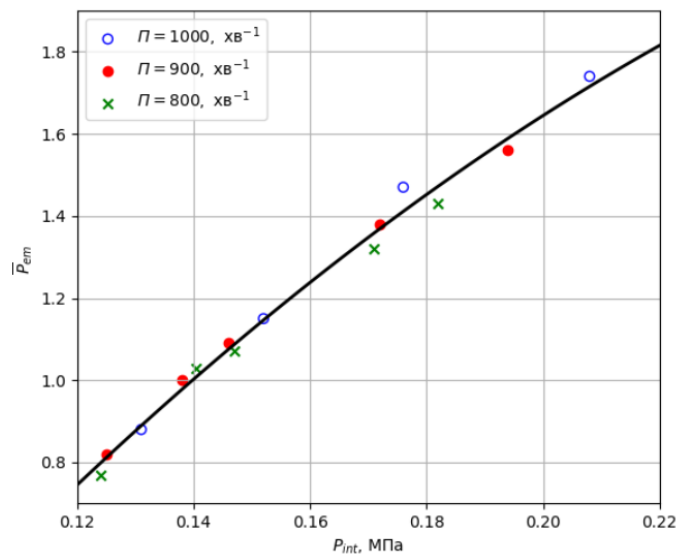


Рис. 4. Вплив тиску наддувального повітря  $P_{int}$  на відносну зміну середнього ефективного тиску в циліндрах  $\bar{P}_{em}$  дизеля 8ЧН26/26

Fig. 4. Influence of charge air pressure  $P_{int}$  on the relative change in the average effective pressure in the cylinders  $\bar{P}_{em}$  of the 8CHN26/26 diesel engine

З урахуванням значення тиску для номінального режиму роботи дизеля (0,206 МПа) рівняння (12) зведемо до такого вигляду:

$$\bar{P}_{em}(P_{int}) = -0,852 + 13,295 \cdot P_{int} - 20,898 \cdot P_{int}^2. \quad (13)$$

Узагальнену характеристику, наведену на рис. 5, можна описати рівнянням виду:

$$\bar{f}_{P_{em}}(n) = 2,384 - 1,107 \cdot 10^{-3} \cdot$$

$$\cdot n - 2,77 \cdot 10^{-7} \cdot n^2. \quad (14)$$

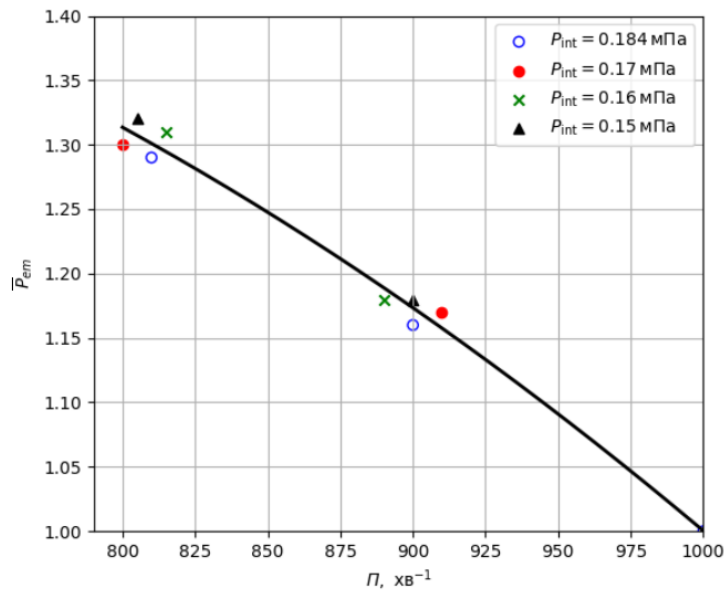


Рис. 5. Вплив частоти обертання колінчатого вала на відносну зміну середнього ефективного тиску в циліндрах  $\bar{P}_{em}$  дизеля 8ЧН26/26

Fig. 5. Effect of crankshaft speed on the relative change in the average effective pressure in cylinders  $\bar{P}_{em}$  of the 8CHN26/26 diesel engine

З урахуванням значення середнього ефективного тиску (0,96 МПа) у вузловій точці та аналітичного представлення функціональних залежностей (13) і (14) рівняння (2) можна звести до такого вигляду:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{em} = & 0.96 \cdot (-0,852 + 13,295 \cdot P_{int} - \\ & -20,898 \cdot P_{int}^2) \cdot (2,384 - 1,107 \cdot 10^{-3} \cdot n \\ & - 2,77 \cdot 10^{-7} \cdot n^2). \end{aligned} \quad (15)$$

Формула для визначення ефективної потужності дизеля 8ЧН26/26 з урахуванням числового значення коефіцієнта ( $a$ ) буде мати вигляд:

$$P_e = 0,9198 \cdot P_{em} \cdot n. \quad (16)$$

Таким чином, вирази (15) і (16) дозволяють визначити ефективну потужність дизеля 8ЧН26/26 тепловоза ТГМ6–А в разі відомих значень тиску наддувального повітря та частоти обертання колінчатого вала дизеля. Для реалізації цього методу необхідно під час роботи силової установки в режимі «вибігу» (за короткочасного навантаження дизеля пусковим гідротрансформатором, постійно контролюючи температуру

мастила гідропередачі) заміряти тиск наддувального повітря і частоту обертання колінчатого вала дизеля. Якщо отримані значення підставити у формулу (10) – для тепловоза ТГМ4, або у формулу (16) – для тепловоза ТГМ6–А, отримаємо значення ефективної потужності дизелів. Ця потужність є комплексним діагностичним параметром дизеля, оскільки інтегрує вплив різних систем і компонентів на робочий процес, а її зміна вказує на широкий спектр можливих несправностей. Аналіз цього показника дозволяє своєчасно виявляти проблеми та підтримувати силову установку тепловозів у належному технічному стані.

### Наукова новизна та практична значимість

Отримали подальший розвиток методи діагностування силових установок тепловозів із гідравлічною передачею та визначення діагностичних параметрів, що характеризують їх технічний стан.

Використання запропонованої методики визначення ефективної потужності дизелів тепловозів з гідравлічною передачею УГП750–1200ПР дозволяє виявляти приховані

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

несправності, оцінювати загальний технічний стан дизеля без його розбирання та визначати потребу в ремонті або регулюванні параметрів.

## Висновки

Для реалізації наведеної методики за об'єкт дослідження було обрано дизелі 8ЧН26/26 тепловоза ТГМ6–А та 6ЧН21/21 тепловоза ТГМ4 з уніфікованою гідравлічною передачею УГП750–1200ПР. Вибір цих тепловозів обумовлений відсутністю можливостей проведення їх післяремонтних випробувань із навантаженням дизеля через особливості конструкції. Що призводить до того, що під час експлуатації їх дизелі можуть мати різний ступінь розрегулювання і, як правило, незадовільний перебіг робочого процесу. Крім цього, на техніко-економічні показники

роботи дизеля суттєво впливає неузгодженість характеристик дизеля та гідропередачі. Особливо така ситуація виникає після проведення капітальних ремонтів дизеля і гідропередачі. Це призводить до збільшення витрати дизельного палива, зниження надійності дизеля та тепловоза в цілому.

За результатами обробки експериментальних даних запропоновано методику визначення ефективної потужності дизеля, яка є інтегральним показником, що характеризує його технічний стан та дозволяє оцінити якість виконання ремонту тепловозів ТГМ4 та ТГМ6–А з гідравлічною передачею УГП750–1200ПР, виявляти приховані несправності, оцінювати загальний технічний стан дизеля без його розбирання та визначати потребу в ремонті або регулюванні параметрів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боднар Б. Є., Бобирь Д. В., Капіца М. І. *Гідравлічні передачі локомотивів*. Дніпро : Дріант, 2021. 466 с.
2. Боднар Е. Б. *Підвищення експлуатаційної надійності локомотивів шляхом впровадження раціональної системи утримання* : дис ... канд. техн. наук. УкрДУЗТ. Харків, 2004. 161 с.
3. Боднар Б. Е. *Теоретические основы, опыт создания систем испытания и диагностирования тепловозов с гидродинамической передачей* : дис. ... докт. техн. наук. Днепропетровский государственный технический университет ж/д транспорта. Днепропетровск, 1997. 366 с.
4. Варбанец Р. А. Параметрическая диагностика дизелей SBV6M540 и Pegaso 9156. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006. № 8 (34). С. 144–148.
5. Капіца М. І., Калівода Я., Недужа Л. О., Очкасов О. Б., Черняев Д. В. *Комп'ютерне моделювання залізничних транспортних засобів*: методичні вказівки до виконання практичних робіт, курсового та дипломного проектування; для студентів усіх форм навчання спеціальності «Залізничний транспорт». Дніпро : ДНУЗТ, 2018. 59 с.
6. Кузнецов Т. Ф., Федорец В. А., Лось И. И., Боднар Б. Е. *Способ определения мощности дизеля, связанного с гидропередачей* : авторское свидетельство СССР № 1457477, МПК 01М 15/00 / заявл. 01.01.1988; опубл. 01.06.1989.
7. Мигаль В. П., Сілевич В. Ю., Мигаль Г. В. Інтегральна діагностика функціонального стану елементів транспортних систем на основі візуалізації шумових сигналів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. Т. 31. С. 102–108.  
DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-2/18>
8. Федорец В. А. Метод многофакторного исследования параметров процесса топливоподачи. *Двигателестроение*. 1982. № 11. С. 34–36.
9. Федорец В. А. Применение метода узловых точек при исследовании потерь на трение в двигателях. *Двигателестроение*. 1981. № 7. С. 50–51.
10. Bodnar B., Ochkasov O., Studenko O. Diesel Engines In-Place Diagnosis of Diesel Locomotives: Modern Approaches and Practical Application. *Proceedings of 28th International Scientific Conference. Transport Means 2024*. (Kaunas, 02–04 Oct. 2024). Kaunas University of Technology. Kaunas, 2024. P. 351–357.  
DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p351-357>
11. Bodnar B., Ochkasov O., Bobyr D., Korenyuk R., Bazaras Ž. Using the Self-Braking Method when the Post-Overhaul Diagnostics of Diesel-Hydraulic Locomotives. *Proceedings of 22nd International Scientific Conference. Transport Means 2018* (Trakai, 03–05 Oct. 2018). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai») [et al.]. Kaunas, 2018. Pt. II. P. 914–919.

12. Bondar B., Ockasov O., Petrenko V., Martishevskij M. Implementing Intelligent Monitoring of the Technical Condition of Locomotive Hydraulic Transmissions. *Transbaltica XIII: Transportation Science and Technology Proceedings of the 13th International Conference Transbaltica* (Vilnius, 15–16 Sept. 2022). Vilnius, 2023. P. 726–736. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3\\_70](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_70)
13. Dai H., Wan L., Zeng Q., Lu Z., Sun Z., Liu W. Method and Test Bench for Hydro-Mechanical Continuously Variable Transmission Based on Multi-Level Test and Verification. *Machines*. 2021. Vol. 9. Iss. 12. P. 358–369. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9120358>
14. Kan Y., Xie S., Yin Q., Jiang W., Yang M., Qian R. Dynamic power matching for wheel loader based on power reflux hydrodynamic transmission system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544070241261107>
15. Merksiz J., Waligórski M. Badania i symulacje dotyczące zastosowania metod wibroakustycznych do diagnozowania wypadania zapłonów w silnikach o zapłonie samoczynnym lokomotyw spalinowych. *Rail Vehicles*. 2008. Nr 3. S. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.53502/rail-139871>
16. Rimar M., Yeromin O., Larionov G., Kulikov A., Fedak M., Krenicky T., Gupalo O., Myanovskaya Y. Method of Sequential Approximation in Modelling the Processes of Heat Transfer and Gas Dynamics in Combustion Equipment. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 23. P. 11948. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122311948>
17. Varbanets R., Shumylo O., Marchenko A., Minchev D., Kyrnats V., Zalozh V., Aleksandrovska N., Brusnyk R., Volovyk K. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. *Polish Maritime Research*. 2022. Vol. 29. Iss. 4. P. 88–96. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>
18. Zhu G., Huang L., Yin J., Gai W., Wei L. Multiple faults diagnosis for ocean-going marine diesel engines based on different neural network algorithms. *Science progress*. 2023. Vol. 106. Iss. 4. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1177/00368504231212765>
19. Zhukovytsky I. V., Kliushnyk I. A., Ochkasov O. B., Korenyuk R. O. Information-measuring test system of diesel locomotive hydraulic transmissions. *Science and Transport Progress*. 2015. No. 5 (59). P. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/53159>

B. Y. BODNAR<sup>1\*</sup>, O. B. OCHKASOV<sup>2\*</sup>, Y. B. BODNAR<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dept. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+ 38 (056) 733 19 01, e-mail b.e.bodnar@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

<sup>2\*</sup>Dept. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail o.b.ochkasov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-7719-7214

<sup>3\*</sup>Dept. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail e.b.bodnar @ ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6040-913X

## Comprehensive Diagnostics of Diesel Locomotives with Hydraulic Transmission: Approaches and Methods

**Purpose.** The main purpose of this article is to determine a generalized indicator of the energy efficiency of the diesel engine operating cycle, which takes into account the complex effect of thermodynamic, mechanical, and hydrodynamic losses that occur during its operation. The proposed indicator makes it possible to assess changes in diesel engine operation caused by a decrease in its thermal efficiency due to a deterioration in the combustion process of the fuel mixture, an increase in mechanical losses caused by the gradual wear of parts, as well as the appearance of additional malfunctions in its systems and components that affect the overall performance of the engine. **Methodology.** To achieve this goal, based on the results of experimental studies, we propose a method for determining the effective power of diesel engines of diesel locomotives TGM4 and TGM6–A with hydraulic transmission UGP750–1200PR, which is an integral indicator characterizing their technical condition and allowing to assess the quality of repair. **Findings.** Based on the experimental studies, a method for determining the effective power of diesel locomotives with a hydraulic transmission UGP750–1200PR during short-term loading by a starting torque converter in the turbine wheel «runaway» mode was developed. The method is based on measuring the diesel engine crankshaft speed and charge air pressure. The processing of experimental data allowed us to propose a method for estimating the effective power of a diesel engine as an integral indicator of its technical condition. This methodology makes it possible to determine the quality of repair of diesel locomotives TGM4 and TGM6–A with hydraulic transmission

UGP750–1200PR, to detect hidden faults, to assess the general technical condition of the diesel engine without disassembly, and to determine the need for repair or adjustment of parameters. **Originality.** The work further developed methods for diagnosing power plants of diesel locomotives with hydraulic transmission and determining diagnostic parameters characterizing their technical condition. **Practical value.** The use of the proposed methodology for determining the effective power of diesel locomotives with hydraulic transmission UGP750–1200PR allows detecting hidden faults, assessing the general technical condition of the diesel engine without disassembling it, and determining the need for repair or adjustment of parameters.

**Keywords:** diesel locomotive; hydraulic transmission; diesel engine; effective power; comprehensive diagnostics; technical condition; post-repair tests; TGM4; TGM6–A

## REFERENCES

1. Bodnar, B. Ye., Bobyr, D. V., & Kapitsa, M. I. (2021). *Hidravlichni peredachi lokomotyviv*. Dnipro: Driant. (in Ukrainian)
2. Bodnar, E. B. (2004). *Pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti lokomotyviv shliakhom vprovadzhenia ratsionalnoi systemy utrymuvannia* (PhD dissertation). UkrSurt. Kharkiv, Ukraine. (in Ukrainian)
3. Bodnar, B. E. (1997). *Teoreticheskie osnovy, opyt sozdaniya sistem ispytaniya i diagnostirovaniya teplovozov sgidrodinamicheskoy peredachey* (Doctoral dissertation). Dnipropetrovsk State Technical University of Railway Transport. Dnipropetrovsk, Ukraine. (in Russian)
4. Varbanets, R. A. (2006). Parametricheskaya diagnostika dizeley SBV6M540 i Pegaso 9156. *Aerospace Technic and Technology*, 8(34), 144-148. (in Russian)
5. Kapitsa, M. I., Kalivoda, Ya., Neduzha, L. O., Ochkasov, O. B., Cherniaev, D. V. (2018). *Komp'yuterne modeliuвання zaliznychnykh transportnykh zasobiv: metodychni vказivky do vykonannya praktychnykh robit, kursovoho ta dyploornoho proektuvannia; dlia studentiv usikh form navchannia spetsialnosti «Zaliznychnyi transport»*. Dnipro: DNUZT. (in Ukrainian)
6. Kuznetsov, T. F., Fedorets, V. A., Los, I. I., & Bodnar, B. E. (1989). *Method for determining the power of a diesel engine connected to a hydraulic transmission* (Author's Certificate of the USSR No. 1457477). (in Russian)
7. Mygal, V. P., Silevytch, V. Yu., & Mygal, G. V. (2020). Integrated diagnostics of the functional state of the elements of transport systems based on visualization of the noise signal. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 2(3), 102-108. DOI: <https://doi.org/10.32838/tnu-2663-5941/2020.3-2/18> (in Ukrainian)
8. Fedorez, V. A. (1982). Metod mnogofaktornogo issledovaniya parametrov protsessa toplivopodachi. *Dvigatelstroeniye*, 11, 34-36. (in Russian)
9. Fedorez, V. A. (1981). The use of nodal point method at investigation of the friction loss in engines. *Dvigatelstroeniye*, 7, 50-51. (in Russian)
10. Bodnar, B., Ochkasov, O., & Studenko, O. (2024, Oct.). Diesel Engines In-Place Diagnosis of Diesel Locomotives: Modern Approaches and Practical Application. In *Proceedings of 28th International Scientific Conference. Transport Means 2024* (pp. 351-357). Kaunas University of Technology. Kaunas, Lithuania. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p351-357> (in English)
11. Bodnar, B., Ochkasov, O., Bobyr, D., Korenyuk, R., & Bazaras, Ž. (2018, Oct.). Using the Self-Braking Method when the Post-Overhaul Diagnostics of Diesel-Hydraulic Locomotives. In *Proceedings of 22nd International Scientific Conference. Transport Means 2018* (Pt. II, pp. 914-919). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai») [et al.]. Kaunas, Lithuania. (in English)
12. Bondar, B., Ochkasov, O., Petrenko, V., & Martishevskij, M. (2023). Implementing Intelligent Monitoring of the Technical Condition of Locomotive Hydraulic Transmissions. In *Transbaltica XIII: Transportation Science and Technology Proceedings of the 13th International Conference Transbaltica* (pp. 726-736). Vilnius, Lithuania. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3\\_70](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_70) (in English)
13. Dai, H., Wan, L., Zeng, Q., Lu, Z., Sun, Z., & Liu, W. (2021). Method and Test Bench for Hydro-Mechanical Continuously Variable Transmission Based on Multi-Level Test and Verification. *Machines*, 9(12), 358-369. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9120358> (in English)
14. Kan, Y., Xie, S., Yin, Q., Jiang, W., Yang, M., & Qian, R. (2024). Dynamic power matching for wheel loader based on power reflux hydrodynamic transmission system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544070241261107> (in English)

15. Merkiş, J., & Waligórski, M. (2008). Badania i symulacje dotyczące zastosowania metod wibroakustycznych do diagnozowania wypadania zapłonów w silnikach o zapłonie samoczynnym lokomotyw spalinowych. *Rail Vehicles*, 3, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.53502/rail-139871> (in Polish)
16. Rimar, M., Yeromin, O., Larionov, G., Kulikov, A., Fedak, M., Krenicky, T., Gupalo, O., & Myanovskaya, Y. (2022). Method of Sequential Approximation in Modelling the Processes of Heat Transfer and Gas Dynamics in Combustion Equipment. *Applied Sciences*, 12(23), 11948. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122311948> (in English)
17. Varbanets, R., Shumylo, O., Marchenko, A., Minchev, D., Kyrnats, V., Zallozh, V., Aleksandrovska, N., Brusnyk, R., & Volovyk, K. (2022). Concept of Vibroacoustic Diagnostics of the Fuel Injection and Electronic Cylinder Lubrication Systems of Marine Diesel Engines. *Polish Maritime Research*, 29(4), 88-96. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046> (in English)
18. Zhu, G., Huang, L., Yin, J., Gai, W., & Wei, L. (2023). Multiple faults diagnosis for ocean-going marine diesel engines based on different neural network algorithms. *Science Progress*, 106(4), 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1177/00368504231212765> (in English)
19. Zhukovytskyu, I. V., Kliushnyk, I. A., Ochkasov, O. B., & Korenyuk, R. O. (2015). Information-measuring test system of diesel locomotive hydraulic transmissions. *Science and Transport Progress*, 5(59), 53-65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/53159> (in English)

Надійшла до редколегії: 24.02.2025

Прийнята до друку: 23.06.2025

## УДК 656.212:004.942

Д. М. КОЗАЧЕНКО<sup>1\*</sup>, О. В. КЛИГА<sup>2</sup>, Є. В. ХАРЧЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта dmytro.kozachenko@outlook.com, ORCID 0000-0003-2611-1350

<sup>2</sup>Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта aleksandr.klyga@gmail.com, ORCID 0009-0003-8705-449X

<sup>3</sup>Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університету науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (073) 321 02 94, ел. пошта kharchenko-e@ukr.net, ORCID 0009-0006-5633-0211

## Моделювання составів поїздів у задачах техніко-експлуатаційної оцінки залізничних станцій

**Мета.** Основною метою роботи є вдосконалення методів моделювання составів поїздів та маневрових передач, що надходять в обслуговування на залізничних станціях. **Методика.** Задача формування розрахункових составів належить до задач експлуатації залізничного транспорту. Для її розв'язання використано методи дослідження операцій: статистичний аналіз для визначення кількості вагонів у розрахунковому вагонопотоці; регресійний аналіз для встановлення залежності між кількістю призначень, довжиною составів та кількістю відчепів; лінійне цілочисельне програмування для розподілу відчепів по складах; теорія ймовірностей для розподілу вагонів по складах. **Результати.** Виконання графічного та імітаційного моделювання станційних процесів вимагає формування розрахункових составів. Вихідними даними для оцінки техніко-технологічних параметрів станцій, які доступні без проведення спеціальних досліджень, є кількість вагонів, що прибувають на певні призначення протягом розрахункового періоду, та кількість вагонів у складах поїздів і маневрових передач. На підставі наведених вихідних даних необхідно розподілити вагони по складах таким чином, щоб структура составів відповідала умовам роботи залізничної мережі. Для розв'язання цієї задачі розроблено методику та алгоритм моделювання составів поїздів і маневрових передач. Методика формування розрахункових составів передбачає виконання шести послідовних етапів: визначення кількості вагонів за окремими призначеннями в розрахунковому вагонопотоці, що прибувають протягом доби; визначення кількості розрахункових составів, що надходять із вхідного потоку, та кількості вагонів у них; визначення середньої кількості відчепів у розрахункових складах; встановлення кількості відчепів у складах; розподіл вагонів розрахункового вагонопотоку по складах; виділення вагонів із технічними та комерційними несправностями. **Наукова новизна.** У роботі вдосконалено метод моделювання розрахункових составів, які використовують у задачах техніко-експлуатаційної оцінки роботи залізничних станцій та під'їзних колій промислових підприємств. **Практична значимість.** Запропонований метод дозволяє інженерам-технологам та проектувальникам на підставі обмеженої кількості вихідних даних формувати состави поїздів із подальшим їх використанням для розв'язання прикладних задач експлуатації залізниць.

**Ключові слова:** залізничний транспорт; перевезення вантажів; залізничні станції; під'їзна колія; імітаційне моделювання

### Вступ

Станції є одним з основних елементів залізничної інфраструктури. Вони забезпечують безпосередній зв'язок залізничного транспорту з населенням, промисловістю, будівельним комплексом, сільським господарством. На залізничних станціях виконують початкові та кінцеві операції перевізного процесу: посадку та висадку пасажирів, навантаження та вивантаження

вантажів, технічне обслуговування, екіпірування і ремонт рухомого складу, комерційний огляд вантажних вагонів, прикордонний і митний огляд на кордоні. Станції є стиковими пунктами залізниць з іншими видами транспорту.

Не менш важливе значення залізничні станції мають для промислового транспорту підприємств. Вони забезпечують функціонування виробничих цехів шляхом підвезення сировини та відвантаження готової продукції. Також через

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

під'їзні колії станції забезпечують зв'язок між промисловим залізничним транспортом та залізничним транспортом загального користування.

Залізничні станції є великими системами, що ускладнює проведення фізичних експериментів з ними. Тому для техніко-експлуатаційного аналізу роботи станцій в основному застосовують аналітичні, графічні та імітаційні моделі.

Вказані фактори свідчать, що дослідження, спрямовані на вдосконалення методів моделювання станційних процесів, є актуальними для залізничного транспорту.

### Мета

Основною метою роботи є вдосконалення методів моделювання составів поїздів та маневрових передач, що надходять в обслуговування на залізничних станціях.

### Методика

Потреба в описі составів виникла разом із появою методів техніко-експлуатаційного аналізу роботи станцій. Перші наукові дослідження в галузі залізничного транспорту ґрунтувались на методах аналітичного моделювання. Їх проводив на початку ХХ сторіччя професор О. Фролов із метою нормування тривалості елементарних маневрових операцій та академік В. Образцов із метою проектування залізничних станцій.

У зв'язку з різким збільшенням обсягів перевезень залізничним транспортом в СРСР у 1930-х роках виникла необхідність удосконалення методів нормування тривалості маневрових операцій. Значний внесок у вирішення цього завдання зробив професор І. Васильєв. Результатом його досліджень стали аналітичні залежності, що дозволяли встановлювати зв'язок між параметрами составів та тривалістю маневрових операцій з ними. Вказані дослідження були узагальнені в книзі «Графіки та розрахунки з організації залізничних перевезень». Викладені положення стали основою для методики нормування, яку використовують на залізничному транспорті до тепер. Проблемам розвитку аналітичних методів розрахунку норм часу на виконання маневрових операцій та оцінки історичного доробку вчених, що його забезпечували, присвячені роботи [5, 6, 12].

В аналітичних моделях, як правило, групи вагонів описують двома параметрами, при цьому обов'язковим параметром є число вагонів у составі. Додатковим параметром може, наприклад, бути кількість відчепів у составі, імовірність розчеплення состава під час маневрів, число колій, на яких розташовані групи вагонів состава перед збиранням. Застосування цих даних дозволяє визначати середні витрати часу на виконання таких технологічних операцій, як сортування составів, закінчення їх формування та інші. Джерелами інформації про довжину составів є добові плани-графіки виконаної роботи, норми довжини составів, встановлені технічно-розпорядчими актами станцій або проектною документацією. Як правило, оцінка довжини маневрових составів не викликає труднощів. З іншого боку, для оцінки кількості вагонів у відчепках чи ймовірності розчеплення составів необхідно проводити спеціальні дослідження, що ґрунтуються на обробці даних первинних документів чи спостережень [2]. Необхідність проведення цих досліджень суттєво ускладнює збір вихідних даних для моделювання процесів реальних станцій, а для станцій, які ще перебувають на стадії проектування, ці параметри можуть бути лише прийнятні. Нормативні документи з розробки технології роботи залізничних станцій загального користування не [4, 7, 8] не містять пояснень щодо вибору розрахункових составів. Водночас посібник з проектування промислових залізничних станцій до Будівельних норм і правил 2.05.07–85 (далі за текстом ППЗС) містив таблиці для вибору числа відчепів у составі залежно від числа вагонів і кількості призначень. Необхідно наголосити, що ППЗС орієнтований на аналітичні методи оцінки техніко-експлуатаційних показників роботи станцій. Через це в розрахунках можливе використання усереднених дробових значень числа вагонів та відчепів у составах. Фактично ці параметри можуть набувати виключно цілих значень.

Залізничні станції являють собою багатоканальні, багатофазні керовані системи масового обслуговування. Через таку характеристику станцій побудова аналітичних моделей, що адекватно відображають процеси їх функціонування, є складною задачею. Тому для детального аналізу взаємодії різних елементів станцій між со-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

бою з початку ХХ сторіччя набули розвитку методи графічного моделювання. Графічною моделлю функціонування станції є її добовий план-графік [4, 7, 8]. Він являє собою відображення роботи станції на спеціальному бланку, де умовними позначеннями показано основні виробничі операції, що відбуваються в її підсистемах. Тривалість окремих операцій при цьому визначають усереднено за аналітичними методами.

Як показують виконані в [13] дослідження, через різне розташування вагонів у групах тривалість виконання операцій з кожним окремих складом може суттєво відрізнитись від середнього. Тому фактична тривалість виконання операцій на станціях є випадковою величиною. Заміна під час моделювання системи масового обслуговування з випадковою тривалістю операцій на систему масового обслуговування з постійною тривалістю операцій викликає похибки в оцінюванні техніко-експлуатаційних показників станцій, що показано у [3]. Водночас побудова добових планів-графіків вручну є складною задачею, що вимагає значних витрат часу. Через це такі похибки вважали допустимими.

Особливо чутливими до розподілу вагонів на групи є моделі розформування складів на сортувальних гірках. Це пов'язано з тим, що умови розподілу на стрілках різко погіршуються в разі послідовного скочування одновагонних відцепів. У зв'язку з цим в [1] під час моделювання складів, які розформовують на сортувальних гірках, запропоновано застосовувати геометричний розподіл імовірності призначення вагонів у складі. Цей розподіл являє собою матрицю, перший рядок якої відповідає першому вагону складу, наступні рядки відповідають призначенню попереднього вагона; стовпці матриці відповідають призначенню наступного вагона. Елементи матриці відповідають імовірності появи вагона певного призначення першим у складі або за попереднім вагоном певного призначення. Заповнення матриці даними здійснюють на основі обробки сортувальних листків або розмічених натурних листків за попередні періоди. Такий підхід дозволяє отримувати склади, розташування вагонів у яких максимально наближено до реальних. Проблемним є застосування методу, запропонованого в [1], для вдосконалення роботи станцій. Як правило, моделювання

роботи станцій пов'язано з їх проектуванням або зміною умов роботи. При цьому порядок побудови матриць геометричного розподілу ймовірностей призначення вагонів у складах для неіснуючих станцій та неіснуючих умов роботи в наукових працях не розкривають.

Розвиток електронно-обчислювальної техніки та програмних засобів забезпечив створення потужного інструменту для оцінки техніко-експлуатаційних характеристик станцій – імітаційного моделювання. Сучасні імітаційні моделі дозволяють реалізувати два підходи. В одному з підходів склади розглядають як єдині об'єкти, а тривалість технологічних операцій визначають за аналітичними виразами відповідно до їхніх параметрів [9, 11]. Фактично такий підхід заснований на тих самих принципах, що і графічне моделювання, однак дозволяє значно швидше отримувати оцінку роботи станції за рахунок автоматизації рутинних операцій. В іншому підході склади розглядають як множину окремих вагонів і тривалість операцій з ними як суму тривалості операцій з окремими вагонами. Такий більш детальний підхід реалізовано зокрема в роботах [10, 14, 15]. Представлені в них імітаційні моделі як одну зі своїх частин мають генератори вхідного потоку складів, однак принципи роботи цих генераторів не розкрито.

## Результати

Вихідними даними для виконання оцінки техніко-експлуатаційних параметрів станцій, які доступними без виконання спеціальних досліджень, є кількість вагонів, що прибувають за певними призначеннями протягом розрахункового періоду, та кількість вагонів у складах поїздів і маневрових передач. На підставі наведених вихідних даних необхідно розподілити вагони по складах таким чином, щоб структура складів відповідала умовам роботи залізничної мережі. Для розв'язання цієї задачі розроблено алгоритм моделювання складів поїздів і маневрових передач.

Для вихідних даних використано такі позначення: кількість призначень  $D$ ; місячні обсяги прибуття вагонів за кожним призначенням  $n_{m,i}$  (тут  $i$  – номер призначення,  $i = \overline{1..D}$ ); імовірності появи вагонів з комерційними чи технічними

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

несправностями різних призначень  $p_{d,i}$ ; коефіцієнт добової нерівномірності  $k_d$ ; максимальна кількість вагонів у складах  $m$ . Вказані дані можуть бути отримані на підставі аналізу експлуатованих залізничних станцій та під'їзних колій або задані у вигляді нормативних значень для проєктованих об'єктів. Задача формування розрахункових складів належить до задач експлуатації залізничного транспорту. Для її розв'язання використовують методи дослідження операцій: статистичний аналіз для визначення кількості вагонів у розрахунковому вагонопотоці; регресійний аналіз для встановлення залежності між кількістю призначень, довжиною складів та кількістю відцепів; лінійне цілочисельне програмування для розподілу відцепів по складах; теорію ймовірностей для розподілу вагонів з іншими призначеннями та вагонів із технічними і комерційними несправностями по складах. Задача формування розрахункових складів є цілочисельною, оскільки і кількість вагонів, і кількість відцепів можуть набувати лише цілих значень.

Методика формування розрахункових складів передбачає виконання шести послідовних етапів. Залежно від змісту конкретної прикладної задачі окремі початкові та кінцеві етапи можуть бути пропущені.

На першому етапі визначають кількість вагонів за окремими призначеннями в розрахунковому вагонопотоці, що прибувають протягом доби. Загальну добову кількість вагонів встановлюють на підставі розрахункового місячного вагонопотоку за формулою:

$$N_d = \left[ \frac{k_d \sum_{i=1}^D n_{m,i}}{30} \right],$$

де  $[ ]$  – операція округлення до цілого числа.

Коефіцієнти добової нерівномірності враховують випадки підвищення обсягів роботи залізничних станцій в окремі доби, їх установлюють на підставі аналізу обсягів перевезень у попередні періоди або приймають залежно від виду перевезень: для внутрішньозаводських перевезень  $k_d = 1,1$ ; для всіх інших перевезень  $1,15 \leq k_d \leq 1,2$ .

Для вагонопотоків залізничних станцій та під'їзних колій характерна наявність основних і додаткових призначень. Вагони основних призначень надходять в обробку систематично, їх обов'язково включають до розрахункового вагонопотоку. Вагони додаткових призначень з'являються епізодично. Прикладом додаткових призначень можуть бути вагони з обладнанням, що прибувають на підприємства один раз на декілька місяців. Окремі вагони цих призначень можуть вимагати значних витрат часу на їх обслуговування, однак імовірність одночасної появи цих вагонів є невисокою. Для визначення переліку основних призначень усі призначення упорядковують за зменшенням кількості вагонів у них. Після цього відбирають  $D_0$  призначень, частка яких у загальному вагонопотоці складає не менше  $p_n$ . Величину  $p_n$  встановлює людина, що виконує моделювання. У загальному випадку  $p_n = 0,9$ . Кількість вагонів основних призначень визначають так:

$$n_{d,i} = \left[ \frac{k_{d,i} n_{m,i}}{30} \right]; \quad i = \overline{1..D_0}.$$

Призначення для залишку  $N_d - \sum n_{d,i}$ ,  $i = \overline{D_0 + 1, D}$  вагонів обирають випадковим чином із множини вагонів  $N_{m,i}$ ,  $i = \overline{D_0 + 1, D}$  виходячи з умови, що кожен вагон додаткового призначення може з'явитись у розрахунковому вагонопотоці з однаковою ймовірністю. Після цього фіксують кількість додаткових призначень та загальну кількість призначень, вагони яких були включені до розрахункового вагонопотоку  $D_d$  та  $D_p = D_0 + D_d$  відповідно.

На другому етапі визначають кількість розрахункових складів, що надходять із вхідного потоку, та кількість вагонів у них. Кількість складів та середню кількість вагонів у складах визначають за виразами:

$$b = \left[ \frac{N_d}{m} \right]; \quad m_{cp} = \frac{N_d}{m}.$$

де  $[ ]$  – операція округлення до більшого цілого числа.

Користувач може обрати один з двох варіантів розрахунку кількості вагонів у складах  $m_j$  (тут  $i = \overline{1..b}$ ). Перший варіант передбачає прибуття  $b-1$  складів по  $m$  вагонів та одного неповного складу із  $N_d + m - bm$  вагонів. Другий варіант передбачає прибуття складів випадкової довжини в межах  $[m - \Delta_m, m]$  вагонів, де  $\Delta_m$  – допустима величина зменшення довжини складу, яку встановлює користувач:

$$\Delta_m \geq \left[ b - \frac{N_d}{m} \right]$$

Третім етапом є визначення середньої кількості відчепів  $g_p$  у розрахункових складах. За наявності статистичних даних спостережень кількість відчепів у складах може бути розрахована на підставі заданої користувачем середньої довжини відчепа  $m_{\text{від}}$ . За відсутності статистичних даних для визначення середньої кількості відчепів у складах адаптовано методику, що наведена в ППЗС. Із метою зменшення впливу на параметри розрахункових складів малопотужних призначень попередньо визначають кількість умовних призначень:

$$D_y = \frac{N_d D_p}{N_d \sqrt{D_p \sum_{i=1}^{D_p} \left( n_{d,i} - \frac{N_d}{D_p} \right)^2}}$$

Для визначення кількості відчепів у складах на основі нормативних таблиць ППЗС отримано регресійні залежності. У ході дослідження виконано апроксимацію цих даних 20 різними виразами. Для розрахунку кількості відчепів у складах запропоновано використовувати вираз:

$$g_p = aD_y^b; \quad g_p \leq c,$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти, значення яких обрано з табл. 1.

Відхилення кількості відчепів у складі, які розраховують за запропонованою методикою, від кількості відчепів, яку визначають за ППЗС, не перевищує 5%. Для проміжних значень  $m_{\text{сп}}$  величину  $g_p$  встановлюють інтерполяцією.

Таблиця 1

## Коефіцієнти для розрахунку кількості відчепів

Table 1

## Coefficients for calculating the number of cuts

$m_{\text{сп}}$	$a$	$b$	$c$
5	2,9284	0,2965	4,9
10	3,5451	0,3535	8,7
15	4,6327	0,2926	9,8
20	5,4823	0,2769	13,8
25	6,5559	0,2449	15,9
30	7,4513	0,2337	17,9
35	8,3986	0,2212	21,3
40	9,3274	0,2106	24,3
45	10,3895	0,1966	25,9
50	11,4706	0,1847	27,0
55	12,4917	0,1768	28,1
60	13,4183	0,1733	29,5

Четвертим етапом є встановлення кількості відчепів у складах  $g_j$ . Вибір величин  $g_j$  здійснюють з умови, що вона повинна перебувати в межах від  $q$  до  $q + \Delta g$ . Величини  $q$  та  $\Delta g$  задає користувач, за замовчуванням вони складають:

$$q = \lfloor g_p \rfloor, \quad \Delta g = 1.$$

Середня кількість відчепів у складах при цьому повинна бути максимально наближена до величини  $g_p$ , встановленої на третьому етапі:

$$\left| \frac{\sum_{j=1}^b g_j}{b} - g_p \right| \rightarrow \min.$$

Кількість відчепів у складах  $g_j$  встановлюють на підставі розв'язання двох оптимізаційних задач цілочисельного програмування:

$$\sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j (q + j - 1) - g_p \rightarrow \min;$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j (q + j - 1) - g_p \geq 0 \\ \sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j = b, \quad x_j \geq 0 \end{cases}$$

та

$$g_p - \sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j (q + j - 1) \rightarrow \min ;$$

$$\begin{cases} g_p - \sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j (q + j - 1) \geq 0 \\ \sum_{j=1}^{\Delta g+1} x_j = b, \quad x_j \geq 0, \end{cases}$$

де  $x_j$  – ціле число составів із заданою кількістю відчепів.

Як остаточне використовують той розв’язок тієї задачі, цільова функція якого приймає менше значення.

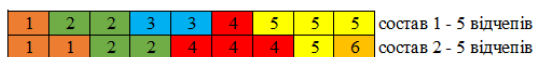
П’ятим етапом є розподіл вагонів розрахункового вагонопотоку по складах. Приклад розподілу 18 вагонів 6 призначень по двох складах, що повинні мати 7 та 6 відчепів, наведено на рис. 1.

Початковий розподіл вагонів по складах (див. рис. 1, а) здійснюють випадковим чином з умови, що кожен вагон може опинитися на будь-якому місці в складах з однаковою імовірністю.

а – а



б – б



в – в



г – д

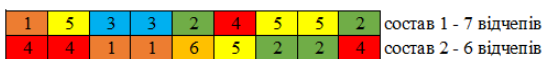


Рис. 1. Розподіл вагонів по складах:

- а – початковий випадковий розподіл вагонів у складах;
- б – склади з мінімальною кількістю відчепів;
- в – склади з максимальною кількістю відчепів;
- г – склади із заданою кількістю відчепів

Fig. 1. Distribution of cars among train sets:

- а – initial random distribution of cars within the train sets;
- б – train sets with the minimum number of cuts;
- в – train sets with the maximum number of cuts;
- г – train sets with the specified number of cuts

Мінімальної кількості відчепів у складах  $g_{\min,i}$  досягають у разі упорядкування вагонів за призначеннями (див. рис. 1, б). Максимальної кількості відчепів у складах  $g_{\max,i}$  досягають в умовах, коли вагони додають до склада по чергово до тих пір, поки додавання вагона наступного призначення призводить до утворення нового відчепа (див. рис. 1, в). Якщо для деяких складів  $g_{p,i} < g_{\min,i}$ , або  $g_{p,i} > g_{\max,i}$ , то виконують перерозподіл вагонів між складами. Якщо для всіх складів  $g_{\min,i} \leq g_{p,i} \leq g_{\max,i}$ , то заданої кількості відчепів у складах досягають зміною порядку розташування вагонів (див. рис. 1, г).

Шостим етапом є виділення вагонів із технічними та комерційними несправностями. Появу вагонів із несправностями моделюють як випадкову подію. Загальну кількість вагонів із несправностями, що повинні бути наявними в розрахунковому вагонопотоці, визначають за виразом:

$$r_n = \left[ \sum_{i=1}^{D_p} p_{n,i} n_{д,i} \right],$$

де  $p_{n,i}$  – імовірність затримки вагонів  $i$ -го призначення через технічні або комерційні несправності.

Імовірності  $p_{n,i}$  можуть бути прийняті на основі обробки даних аналізу документів наявних залізничних станцій та під’їзних колій. Для проєктованих об’єктів імовірності  $p_n$  можуть бути прийняті залежно від виду вантажу за табл. 2.

Таблица 2

**Імовірності затримки вагонів через технічні або комерційні несправності**

Table 2

**Probabilities of wagons detention due to technical or commercial faults**

Вид вантажу	$p_n$
Зернові вантажі	0,066
Навальні вантажі, наливні вантажі, обладнання, контейнери	0,003
Інші вантажі	0,011
Порожні вагони під завантаження	0,100

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Після визначення загальної кількості вагонів із несправностями встановлюють випадкове розташування цих вагонів у складах. Імовірність того, що  $i$ -й вагон розрахункового потоку з  $n$  вагонів буде затриманий через технічну або комерційну несправність, складає:

$$P_{3,i} = \frac{P_{n,i}}{\sum_j^n P_{n,i}}$$

Вибір номера вагона  $k$  з несправністю здійснюють за умовою:

$$k \rightarrow \min, \quad k = \overline{1..n};$$

$$R \leq \sum_i^k P_{3,i},$$

де  $R$  – випадкове число, що рівномірно розподілено в інтервалі від 0 до 1.

Під час визначення розташування першого вагона з несправністю величину  $n$  приймають рівною  $N_d$ . Після вибору наступного вагона з несправністю величину  $n$  зменшують на 1.

Основна перевага наведеної методики над методикою, викладеною в ППЗС, полягає в тому, що вона дозволяє формувати розрахункові склади з деталізацією до розташування окремих вагонів, а ППЗС забезпечує лише встановлення середньої кількості вагонів та відцепів у складах. Недоліком запропонованої методики порівняно з методикою [1] є те, що вона не дає можливості відтворити взаємозв'язки в порядку прямування окремих відцепів, однак для більшості задач експлуатації залізниць цей порядок не впливає на остаточні рішення. Перевага запропонованої методики над методикою [1] полягає в тому, що отримання вихідних даних для формування складів не потребує обробки інформації з первинних джерел та проведення спостережень над роботою об'єктів залізничного транспорту.

Запропонована методика програмно реалізована. Основне вікно програми наведено на рис. 3. Її використання обмежує вплив людського фактора на результати перевірки відповідності технічного забезпечення залізничних станцій і під'їзних колій наявним та плановим обсягам роботи.

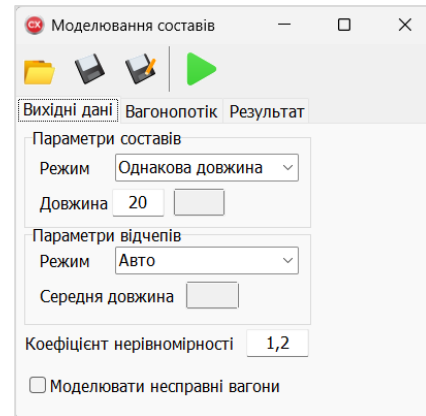


Рис. 2. Вікно програми моделювання складів

Fig. 2. Window of the train sets modeling program

### Наукова новизна та практичне значення

У роботі вдосконалено методику моделювання розрахункових складів, які використовують у задачах техніко-експлуатаційної оцінки роботи залізничних станцій та під'їзних колій промислових підприємств.

Запропонована методика дозволяє інженерам-технологам та проектувальникам на підставі обмеженої кількості вихідних даних формувати склади поїздів із подальшим їх використанням для розв'язання прикладних задач експлуатації залізниць.

### Висновки

Виконані дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Графічне та імітаційне моделювання станційних процесів вимагає формування розрахункових складів. Наявні методи розв'язання цієї задачі або лише встановлюють середнє число вагонів та відцепів у складах, або вимагають значних ресурсів на збір вихідних даних. Для сучасних імітаційних моделей необхідні склади, у яких деталізовано розташування окремих вагонів.

2. Методика формування розрахункових складів передбачає виконання шести послідовних етапів: визначення кількості вагонів за окремими призначеннями в розрахунковому вагоно-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

потоці, що прибувають протягом доби; визначення кількості розрахункових составів, що надходять із вхідного потоку, та кількості вагонів у них; визначення кількості відчепів у розрахункових складах; встановлення кількості відчепів у складах; розподіл вагонів розрахункового вагонопотоку по складах; виділення вагонів із те-

хнічними та комерційними несправностями. Запропоновану методику було програмно реалізовано. Вона дозволяє обмежити вплив людського фактора на результати перевірки відповідності технічного забезпечення залізничних станцій і під'їзних колій наявним та плановим обсягам роботи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобровский В. И. Эргатические модели сортировочных горок. *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. 2001. № 5. С. 7–11.
2. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Горбова О. В. Організація передпроектного обстеження залізничних станцій та вузлів. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2014. Вип. 7. С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2014/35985>
3. Коробйова Р. Г. Інформаційна модель для аналізу станційних процесів на ЕОМ. *Наука та транспортний прогрес*. 2010. Вип. 31. С. 50–54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2010/13473>
4. *Рекомендований технологічний процес роботи вантажної станції*. Київ : ТОВ “НВП Поліграфсервіс”, 2005. 224 с.
5. Стрелко О. Г. Аналіз наукового доробку професора О. М. Фролова (1863–1939) в галузі експлуатації залізниць. *Наукові праці історичного факультету Запорізького національного університету*. 2015. Вип. 43. С. 361–365.
6. Стрелко О. Г., Бердніченко Ю. А. Роль академіка В. М. Образцова в розробці проблем комплексного розвитку транспорту. *Історія науки і техніки*. 2016. Т. 6, № 8. С. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2016-6-8-52-61>
7. *ЦД-0018 Типовий технологічний процес роботи дільничної станції*. Київ : Укрзалізниця, 1998. 243 с.
8. *ЦД-0017 Типовий технологічний процес роботи сортувальної станції*. Київ : Укрзалізниця, 1998. 243 с.
9. Čamaj J., Nedeliaková E., Šperka A., Ližbetinová L. The Planning of Investment Activities in Field of Railway Transport with Support of Simulation Tools. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 53. P. 39–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.005>
10. Galadíková A., Adamko N. Simulation-based methods to support the real-time management of railways nodes. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 55. P. 1345–1352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.119>
11. Johansson I., Palmqvist C.-W., Sipilä H., Warg J., Bohlin M. Microscopic and macroscopic simulation of early freight train departures. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022. Vol. 21. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100295>
12. Kozachenko D. M., Verlan A. I., Korobiova R. H. Development of Analytical Methods for Calculating Time Standards for Shunting Operations. *Science and Transport Progress*. 2021. № 1 (91). P. 51–64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/228097>
13. Kozachenko D., Gera B., Taran I., Korobiova R., Malashkin V., Hermaniuk Yu. Improvement of the Method of Time Rationing for Assembling Car Groups on One Track. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. No. 1. P. 147–153. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/147>
14. Li B., Yun C., Xu G., Zhou X., Xuan H. Optimization of Simultaneous Delivery and Pickup Wagon Scheme on Hybrid Siding Network of Railway Terminal. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2022. Vol. 2022. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/6713617>
15. Sadeghi M., Bagheri M., Pishvae M. S. Evaluation of rail terminals in container ports using simulation: A case study. *SIMULATION*. 2021. Vol. 97. Iss. 12. P. 809–820. DOI: <https://doi.org/10.1177/00375497211024731>

D. M. KOZACHENKO<sup>1\*</sup>, O. V. KLYGA<sup>2</sup>, Ye. V. KHARCHENKO<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Transport service and logistics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail dmytro.kozachenko@outlook.com, ORCID 0000-0003-2611-1350

<sup>2</sup>Dep. «Transport service and logistics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail aleksandr.klyga@gmail.com, ORCID 0009-0003-8705-449X

<sup>3</sup>Dep. «Transport service and logistics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (073) 321 02 94, e-mail kharchenko-e@ukr.net, ORCID 0009-0006-5633-0211

## Modeling of Train Sets in Tasks of Railway Stations Technical and Operational Evaluation.

**Purpose.** The purpose of the paper is to improve the methods of modeling train sets and shunting compositions that arrive for servicing at railway stations. **Methodology.** The task of train sets forming belongs to the tasks of railway transport studies. For its solution, operations research methods are used: statistical analysis to determine the number of cars in the design car flow; regression analysis to establish the relationship between the number of destinations, the length of the train set, and the number of cuts; linear integer programming for the distribution of cuts among the train sets; probability theory for the distribution of cars among the train sets. **Findings.** The execution of graphical and simulation modeling of station processes requires the formation of train sets design. The input data for performing the evaluation of the technical and technological parameters of stations, which are available without conducting special studies, are the number of cars arriving at specific destinations during the design period and the number of cars in the train sets and shunting compositions. Based on the provided input data, it is necessary to distribute the cars among the train sets in such a way that the structure of the consists corresponds to the operating conditions of the railway network. To solve this task, a methodology and algorithm for modeling the train sets and shunting compositions have been developed. The methodology for the formation of train sets includes the execution of six sequential stages: determining the number of cars for each specific destination in the design car flow arriving during the day; determining the number of train sets arriving from the incoming flow, and the number of cars in them; determining the average number of cuts in the designed train sets; establishing the number of cuts in the train sets; distributing the cars of the design car flow among the train sets; identifying cars with technical and commercial faults. **Originality.** The scientific novelty of the work lies in the fact that it improves the method of modeling design train sets used in the tasks of technical and operational evaluation of railway stations and sidings of industrial enterprises functioning. **Practical value.** The practical significance of the work lies in the fact that the proposed method allows process engineers and designers on the basis of a limited amount of input data, to form train sets for their further use in solving applied tasks of railway operation.

**Keywords:** railways; cargoes transportation; railway stations; industrial siding; simulation

### REFERENCES

1. Bobrovskiy, V. I. (2001). Ergaticheskie modeli sortirovochnykh gorok. *Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 5, 7-11. (in Ukrainian)
2. Kozachenko, D. M., Vernyghora, R. V., & Ghorbova, O. V. (2014). Organization of the pre-survey train stations and nodes. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 7, 27-32. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2014/35985> (in Ukrainian)
3. Korobjova, R. H. (2013). The information model for the analysis of plant processes on the computer. *Science and Transport Progress*, 31, 50-54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2010/13473> (in Russian)
4. *Rekomendovanyi tekhnolohichni protses roboty vantazhnoi stantsii*. (2005). Kyiv: TOV «NVP Polihrafservis». (in Ukrainian).
5. Strelko, O. G. (2015). The analysis of the professor O. M. Frolov's scientific heritage (1863-1939) in the field of railway operation. *Scholarly Works of the Faculty of History, Zaporizhzhya National University*, 43, 361-365. (in Ukrainian)
6. Strelko, O., & Berdnychenko, Yu. (2016). The role of academician V. M. Obraztsov in the development of complex transport development issues. *History of Science and Technology*, 6(8), 52-61. DOI: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2016-6-8-52-61> (in Ukrainian)
7. *TsD-0018 Typovyi tekhnolohichni protses roboty dilnychnoi stantsii*. Kyiv: Ukrzaliznytsia. (in Ukrainian)

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

8. *TsD-0017* *Typovi tekhnolohichni protses roboty sortovalnoi stantsii*. Kyiv: Ukrzaliznytsia. (in Ukrainian)
9. Čamaj, J., Nedeliaková, E., Šperka, A., & Ližbetinová, L. (2021). The Planning of Investment Activities in Field of Railway Transport with Support of Simulation Tools. *Transportation Research Procedia*, 53, 39-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.005> (in English)
10. Galadíková, A., & Adamko, N. (2021). Simulation-based methods to support the real-time management of railways nodes. *Transportation Research Procedia*, 55, 1345-1352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.119> (in English)
11. Johansson, I., Palmqvist, C.-W., Sipilä, H., Warg, J., & Bohlin, M. (2022). Microscopic and macroscopic simulation of early freight train departures. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 21, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100295> (in English)
12. Kozachenko, D. M., Verlan, A. I., & Korobiova, R. H. (2021). Development of Analytical Methods for Calculating Time Standards for Shunting Operations. *Science and Transport Progress*, 1(91), 51-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/228097> (in English)
13. Kozachenko, D., Gera, B., Taran, I., Korobiova, R., Malashkin, V., & Hermaniuk, Yu. (2024). Improvement of the Method of Time Rationing for Assembling Car Groups on One Track. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 147-153. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/147> (in English)
14. Li, B., Yun, C., Xu, G., Zhou, X., & Xuan, H. (2022). Optimization of Simultaneous Delivery and Pickup Wagon Scheme on Hybrid Siding Network of Railway Terminal. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/6713617> (in English)
15. Sadeghi, M., Bagheri, M., & Pishvae, M. S. (2021). Evaluation of rail terminals in container ports using simulation: A case study. *SIMULATION*, 97(12), 809-820. DOI: <https://doi.org/10.1177/00375497211024731> (in English)

Надійшла до редколегії 28.02.2025

Прийнята до друку 26.06.2025

# МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.837.7–047.44

Р. П. ПОГРЕБНЯК<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, Дніпро, Україна, 49009, тел. +38 (095) 499 75 54, ел. пошта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

## Раціональний структурний синтез схем кривошипно-повзункових механізмів захоплювальних пристроїв

**Мета.** Дослідження присвячено визначенню шкідливих надлишкових зв'язків (НЗ) у внутрішніх та зовнішніх контурах захоплювальних пристроїв, що побудовані на основі спарених схем кривошипно-повзункових механізмів. **Методика.** Визначення надлишкових (повторювальних) зв'язків здійснено з використанням універсальної структурної теорії механізмів. **Результати.** Механізми без надлишкових зв'язків, у тому числі і механізми захоплювачів, більш надійні, в експлуатації мають вищий коефіцієнт корисної дії та статично визначені. Раціональне конструювання таких механізмів без проведення ретельного структурного аналізу ускладнене. У захоплювальних пристроях визначення надлишкових зв'язків у контурах механізмів відбувається на двох різних етапах їх функціонування: до затискання об'єкта маніпулювання і після. Такі механізми змінної структури потребують відповідного подвійного структурного аналізу, головною метою виконання якого є визначення повторювальних зв'язків на кожному з цих етапів. Проведений таким чином структурний аналіз дозволив визначити кількість і розташування внутрішніх і зовнішніх надлишкових зв'язків. Пошук надлишкових зв'язків на другому етапі роботи захоплювачів, коли утворюються нові контури в механізмах, потребує використання зовнішньої структурної формули. Усунення надлишкових зв'язків у внутрішніх контурах механізмів здійснено за рахунок зниження класу кінематичних пар. Достовірне визначення кількості надлишкових зв'язків у зовнішніх контурах можливо здійснити тільки з урахуванням дрібності неутримувальних зв'язей. **Наукова новизна.** Уперше виконано структурний аналіз спарених паралелограмних схем захоплювальних пристроїв, які побудовані на основі центрального й дезаксального кривошипно-повзункових механізмів і мають змінну структуру із зовнішніми однобічними неутримувальними зв'язями. **Практична значимість.** Отримані результати досліджень дозволили визначити розташування внутрішніх і зовнішніх надлишкових зв'язків у контурах механізмів і запропонувати дії для зменшення кількості шкідливих надлишкових зв'язків у зовнішньому контурі механізмів. Проведено усунення фрикційних надлишкових зв'язків у зовнішньому контурі механізмів шляхом зміни форм поверхонь затискних елементів захоплювача, що контактують з об'єктом маніпулювання.

**Ключові слова:** структурний аналіз механізму; рухомість механізму; надлишкові зв'язки (НЗ); зовнішні зв'язки; однобічні зв'язи

### Вступ

Як відомо, механізми, які спроектовані і виконані без повторювальних (надлишкових) зв'язків (НЗ) у контурах, у тому числі і захоплювальні механізми (захоплювачі), більш надійні в експлуатації та мають вищий ККД. Ефективна працездатність механізмів, зокрема і захоплювальних пристроїв, значною мірою

залежить від раціональної побудови та відсутності в складі схеми шкідливих НЗ.

Найважливіші переваги механізмів без НЗ [3, 10] над механізмами, що їх мають у своєму складі, такі: механізми без НЗ статично визначені, тобто в кінематичних парах таких механізмів не виникають реакції, крім тих, що викликані дією зовнішнього навантаження; такі механізми зби-

## МАШИНОБУДУВАННЯ

рають без натягів, вони не чутливі до незначного відхилення розмірів ланок механізму і станини; у таких механізмах рідше утворюються зазори, у них незначне зношування кінематичних пар; вони мають вищу надійність і нижчу вартість експлуатації. У разі пружних деформацій під дією навантаження, температурних деформацій або похибок виготовлення, повторювальні зв'язки можуть призвести до виникнення додаткових напружень у ланках і рухомих з'єднаннях механізму та викликати їхнє заклинювання або навіть руйнування. Тому для отримання більш ефективного й надійного захоплювального механізму його проєктування доцільно здійснювати за схемами, які позбавлені шкідливих НЗ. Такі механізми ще називають самоустановлюваними.

Захоплювальні пристрої мають обмежену кількість рухомих ланок із переважно кінематичними з'єднаннями п'ятого класу, індивідуальний привід і зазвичай одну основну рухомість.

Проєктування різних схем і конструкцій захоплювачів різного призначення передбачає етапи обов'язкового кінематичного й кінето-статичного розрахунків, компонування і конструювання, а етап структурного аналізу й синтезу механізму зазвичай не передбачено. Часто виконують неповний структурний аналіз, який обмежують визначенням числа кінематичних пар, ланок та ступенів свободи механізму. Невизначення основного структурного параметра механізму – наявності і кількості в схемі НЗ, що визначають ефективність його роботи, – не дає можливості застосувати дії щодо їхнього усунення або зменшення.

Розроблено численні схеми й конструкції механізмів захоплювачів різного призначення, спрогнозовано тенденції і стратегії розвитку та запропоновано рекомендації з їх проєктування у [13]. Виконано дослідження структури механізмів із пошуком та усуненням шкідливих НЗ в окремих механізмах трубоправильних машин у [12], механізмах змішування сипких дрібнодисперсних речовин – в [11], паливного насоса – у [8], кермових механізмів – у [9].

### Мета

Основна мета роботи – провести структурний аналіз центрального і дезаксіального спарених паралелограмних кривошипно-повзункових механізмів захоплювальних при-

строїв із ведучим повзунком, які є механізмами подвійної структури із зовнішніми однобічними в'язями. Підлягає визначенню наявності і розташування шкідливих НЗ у внутрішніх і зовнішніх ланцюгах схем механізмів із подальшою розробкою способів їх зменшення.

### Методика

Визначення надлишкових (повторювальних) зв'язків здійснено з використанням універсальної структурної теорії механізмів [3] у послідовності:

- обчислення загальної рухомості механізмів  $W$  з урахуванням основних і місцевих рухливостей та динамічних в'язей;
- побудова пласкої структурної схеми механізмів із визначенням у ній кількості і розташування контурів  $k$ ;
- розрахування загальної рухливості  $f$  усіх кінематичних пар;
- розрахування загальної кількості  $\sigma$  НЗ;
- аналіз результату з визначенням кількості і розташування НЗ за контурами.

Для механізмів змінної структури проведено аналіз для кожного стану окремо з використанням відповідних аналітичних залежностей, а для механізмів захоплювачів із зовнішніми контурами використано зовнішню структурну формулу, яка дозволяє за контурами відокремити внутрішні й зовнішні НЗ.

Застосовано підхід з визначення структурних параметрів механізмів з урахуванням дрібності неутримувальних в'язей [4].

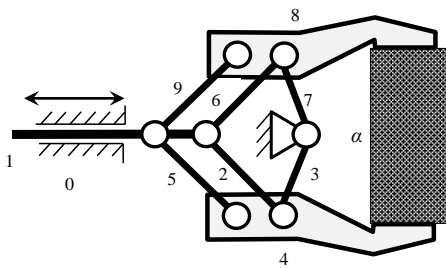
### Результати

Для забезпечення підвищеної вантажопідйомності захоплювальні пристрої оснащують паралельними механізмами. Затискні елементи захоплювача не потребують спеціального профілювання, якщо об'єктом маніпулювання є деталі призматичної форми. Найбільш поширені захоплювальні пристрої зі спареними механізмами мають велику кількість НЗ у внутрішніх та зовнішніх контурах.

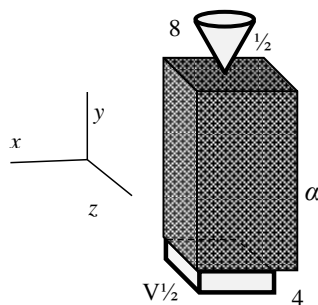
Поконтурне визначення НЗ проводимо за побудованою на основі кінематичної структурною схемою, на якій римськими цифрами позначено клас (число в'язей) кінематичних пар, а арабськими – ланки.

## МАШИНОБУДУВАННЯ

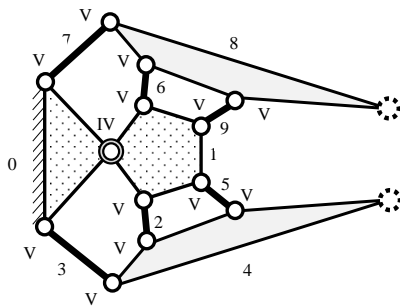
a – a



б – б



в – в



г – д

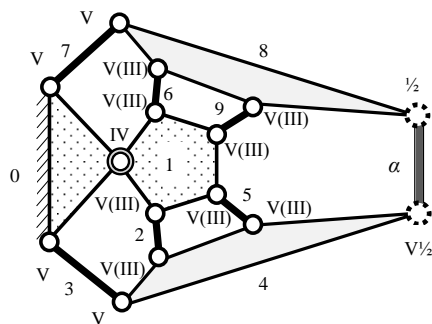


Рис. 1. Кінематична і структурні схеми спареного центрального кривошипно-повзункового механізму захоплювача з ведучим повзунком у різних станах функціонування

Fig. 1. Kinematic and structural diagrams of a paired central crank-slider gripper mechanism with a traction slider in different states of operation

Спарений паралелограмний центральний кривошипно-повзунковий стрижневий механізм захоплювача з ведучим повзунком (рис. 1, а) має дев'ять рухомих ланок і стійку. Перевага схеми в тому, що більшість кінематичних пар у ній – обертальні, поступальна пара 0–1 тільки одна, яка легко реалізується пневмо-або гідроприводом. Ведучий повзунок 1 утворює ведучу пару зі стійкою 0 і впливає на хитунни 2 і 6, які з'єднані з коромислами 3 і 7. Ланки 4 і 8 із затискними елементами шарнірно з'єднані з кінцями хитунів 2 і 6. Плаский рух затискних елементів захоплювача забезпечують додані діади 4–5 та 8–9, які утворюють паралелограми.

Механізми захоплювачів є механізмами змінної структури, мають різні параметри схеми в різних станах функціонування, і тому їх структурний аналіз потрібно проводити для кожного стану. Для захоплювальних пристроїв таких станів два: до затискання об'єкта маніпулювання затискними елементами захоплювача, коли накладені тільки внутрішні в'язі, і після накладання зовнішніх в'язей у стані захоплення об'єкта.

*Перший стан – до затискання об'єкта маніпулювання.* Одношарова симетрична складна напіввідкрита з чотирма базовими ланками структурна схема механізму (рис. 1, б) складається з дев'яти рухомих ланок, тринадцяти з'єднань (у тому числі 5 складних шарнірів) і чотирьох контурів (четвертого класу за Озолсом [3]  $k = 4$ ). Основні внутрішні структурні параметри кінематичного ланцюга:  $n = 10$  – число ланок;  $p = 13$  – число з'єднань;  $f = 13 \cdot 1 = 13$  – загальна рухливість кінематичних пар (вважаємо всі кінематичні пари однорухомими). Перевірка за основною геометричною залежністю підтверджує правильність побудови структурної схеми:  $p = n + k - 1$  ( $13 = 10 + 4 - 1$ ).

Для пласкої схеми визначимо рухомість механізму  $W$  за формулою Грюблера:

$$W = 3(n - 1) - 2p_5 - p_4, \quad (1)$$

тут  $p_5 = 13$  – число однорухомих кінематичних пар (п'ятого класу);  $p_4 = 0$  – число дворухомих кінематичних пар (четвертого класу), у схемі їх немає (тягова циліндрична пара 0 – 1 має другу рухомість у площині, перпендикулярній пло-

## МАШИНОБУДУВАННЯ

щині схеми, тому у площині схеми ця пара є парою п'ятого класу). Тоді  $W = 3(10 - 1) - 2 \cdot 13 - 0 = 1$ , тобто в механізмі одна рухомість, і для визначеності його руху достатньо однієї ведучої ланки й одного двигуна.

Загальне число НЗ знайдемо за формулою Озолса [3]:

$$\sigma = W + 6k - f. \quad (2)$$

Пошук НЗ за цією формулою здійснюємо для просторової схеми, тому рухомість усіх кінематичних пар складе  $f = 12 \cdot 1 + 1 \cdot 2 = 14$ , а число НЗ буде  $\sigma = 1 + 6 \cdot 4 - 14 = 11$ . У топологічно однакових і симетричних двох контурах 1–2–4–5 та 1–6–8–9 утворюються по три НЗ, а загальна для контурів 0–1–2–4–3 та 0–1–6–8–7 оберտальна рухливість у напрямних ведучого повзунка використана під час збирання тільки в одному контурі (наприклад, 0–1–2–4–3) і зменшує в ньому кількість НЗ. Ця рухливість уже не може бути використана для самоустановлення в іншому контурі (0–1–6–8–7). Той контур, який буде зібрано першим, використає цю кутову рухливість, інший буде зібрано з натягом. Тому в одному контурі (0–1–2–4–3) з'являються два надлишкові зв'язки, а в іншому (0–1–6–8–7) – три.

Ці НЗ в замкнених контурах паралелограмів 1–2–4–5 і 1–6–8–9 через можливу непаралельність осей шарнірів можуть утворити скручування і вигин хитунів, і ці деформації будуть викликані не дією зовнішньої сили, а дією цих НЗ.

Найпростішим та ефективним способом усунення НЗ є збільшення рухливості кінематичних пар.

Рекомендовані для заміни класи кінематичних пар, які у внутрішніх контурах дозволять зменшити кількість НЗ, на рис. 1, з написано в дужках. Однорухомі кінцеві шарніри коромисел 2, 5, 6 і 9 замінено на сферичні III класу, а місцева оберտальна рухливість ланок 4 і 8 не може бути дозволена встановленням сферичних шарнірів у з'єднаннях 3–4 та 7–8 як шкідлива. Після реалізації цих рекомендацій загальна рухливість усіх з'єднань складе  $f = 4 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 8 \cdot 3 = 30$ , утворяться п'ять місцевих рухливостей – обертання коромисел 2, 5, 6 і 9 та повзунка 1 навколо своїх поздовжніх осей. Тоді зага-

льна рухомість схеми складе  $W = 1 + 5 = 6$ , а схема позбудеться всіх внутрішніх НЗ:  $\sigma = 6 + 6 \cdot 4 - 30 = 0$ .

Існують рішення із заміни сталевих деталей кінематичних пар на з'єднання з полімерно-композитного матеріалу [1], або використання гумометалевих шарнірів [2] у вузлах із невеликою відносною робочою деформацією, що також може збільшити беззасторожну рухомість контурів за рахунок пружних деформацій зчленувань.

*Другий стан – об'єкт маніпулювання затиснутий* (рис. 1, б, з). На цьому етапі накладаються зовнішні в'язі, і структура механізму змінюється. Механізми захоплювачів у стані затискання об'єкта завжди мають зовнішні зв'язки, тому розглядати їх потрібно у двох станах: ізольовано від об'єкта маніпулювання (від зовнішнього тіла), з якими він має зовнішні зв'язки (число ступенів свободи механізму за відсутності зовнішніх в'язей називають фактичною рухомістю ( $W_{\phi}$ )); у робочому стані, коли об'єкт затиснутий і діють зовнішні в'язі (рухомість за накладених зовнішніх в'язей  $W_{\text{роб}}$  – робоча рухомість механізму;  $W_{\text{роб}}$  менша за  $W_{\phi}$  на число накладених зовнішніх в'язей). Перший стан механізму відповідає етапу до захоплення об'єкта маніпулювання, другий – коли об'єкт захоплений.

Подальший аналіз механізму, який має зовнішні зв'язки, виконуємо з використанням скорегованої зовнішньої структурної формули, яка дозволяє визначити в такому механізмі наявність і кількість зовнішніх НЗ [5]:

$$\sigma_a = S_a - \left[ (W_{\phi} - W_{\text{роб}}) + W_a - S_{ai} \right], \quad (3)$$

де  $S_a$  – число зовнішніх зв'язків;  $(W_{\phi} - W_{\text{роб}})$  – зменшення рухомостей зовнішніх тіл під дією зовнішніх в'язей;  $S_{ai}$  – кількість зовнішніх в'язей, які позбавляють основної рухомості механізму і одночасно усувають усі рухливості зовнішнього тіла;  $W_a$  – зменшення рухомості зовнішніх тіл після накладання зовнішніх в'язей.

Після захоплення об'єкта  $a$  в схемі замикається контур 1–9–8– $a$ –4–5, а зовнішнє тіло  $a$  і механізм у цілому втрачають рухомість повністю  $W_{\text{роб}} = 0$ .

Якщо між пласкими затискними елементами та об'єктом маніпулювання тертя ковзання до-

## МАШИНОБУДУВАННЯ

статне для унеможливлення руху між ними, то в зовнішніх парах 4– $\alpha$  і  $\alpha$ –8 накладаються однією неутримувальні в'язі, які утворюють дробові з'єднання  $V^{1/2}$  класу, тобто  $S_a = 2 \cdot 5,5 = 11$ . Важливо відзначити, що зовнішні в'язі передають силу уздовж осі  $x$  і накладають усі голономні фрикційні зв'язки тільки в разі замикання контуру затисканням зовнішнього тіла ланками 8 і 4.

Фактична рухомість механізму, який позбавлений впливу зовнішніх в'язей, до захоплення складе  $W_\phi = 1$ , параметр  $W_a = 6$ , тому що об'єкт відносно затискних елементів став нерухомим,  $S_{ai} = 1$  – в'язь, яка наклала обмеження на зовнішнє тіло й одночасно позбавила єдиної рухомості увесь механізм.

Кількість зовнішніх НЗ за формулою (2) буде  $\sigma_a = 11 - [(1 - 0) + 6 - 1] = 5$ , три з яких двічі обмежують передавання моменту щодо осі  $y$  і передачу сил уздовж осей  $x$  і  $z$ , а з'являються під час накладання голономних фрикційних в'язей. Достатньо, щоб один затискний елемент захоплювача утворював зазначені зв'язки. Ще два з визначених зовнішніх НЗ проявляються в разі непаралельності поверхонь затискних елементів захоплювача і бічних поверхонь об'єкта у двох взаємно перпендикулярних площинах.

Один із варіантів захоплювача, затискні елементи якого накладають 6 зв'язків і позбавляють механізм усіх зовнішніх НЗ, показано на рис. 1, б. Якщо б тіла 4 і 8 були елементами однієї ланки, то їхнє з'єднання з тілом  $\alpha$  можна було б вважати однією двосторонньою парою шостого класу з кінематичним замиканням. Тут з'єднання трьох різних тіл і замикання контуру відбувається накладанням односторонніх неутримувальних в'язей, які у формулі (3) враховано як дробові. Точкова пара  $\alpha$ –8 обмежує переміщення зовнішнього тіла  $\alpha$  вздовж координати  $y$  тільки знизу вгору, тобто накладається половина в'язі. Відповідно, у площинній парі 4– $\alpha$  накладається  $V^{1/2}$  в'язей. Тоді  $\sigma_a = 6 - [(1 - 0) + 6 - 1] = 0$ , однак слід мати на увазі, що усунення фрикційних НЗ шляхом зміни форм поверхонь, які контактують, істотно знизить величину сил і моментів, що передаються, і вимагатиме збільшення необхідного зусилля затискання, що може викликати пошкодження об'єкта в разі реалізації точкового контакту між

об'єктом і затискним елементом. Якщо об'єктом маніпулювання є тіло циліндричної форми, то форма обох затискних елементів може бути призматичною, або одна призматичною, а друга пласкою. У цьому випадку ненадійних фрикційних в'язей накладається менше за рахунок збільшення накладання значно надійніших геометричних.

Якщо зміна форми поверхонь, які контактують, неможлива або не доцільна, позбутися дії зовнішніх НЗ можна введенням у схему розвантажувального з'єднання [5], м'яких еластичних накладок або м'яких захоплювачів [7], здатних компенсувати перекося під час затискання об'єкта. Використанням таких засобів усунення НЗ ймовірна непаралельність сторін об'єкта буде нівельована місцевими пружними деформаціями або самоустановленням.

Перевірка загальної кількості НЗ за залежністю (4) підтвердила відсутність в схемі НЗ:

$$\sigma = S - \left\{ \left[ 6(n-1) - W_{роб} \right] + W_a - S_{ai} \right\}; \quad (4)$$

$$\sigma = 59 - \left[ 6(10-1) - 0 + 6 - 1 \right] = 0,$$

тут  $S_i = 4 \cdot 5 + 1 \cdot 4 + 8 \cdot 3 = 48$  – кількість внутрішніх в'язей;  $S = S_i + S_a = 48 + 11 = 59$  – загальна кількість внутрішніх і зовнішніх в'язей.

Виконаний за цією поліпшеною схемою механізм захоплювача, у якому внутрішні і зовнішні НЗ відсутні, гарантовано буде мати більш високі показники експлуатації.

Розглянемо ще одну схему захоплювача пристрою, в основі якого також лежить кривошипно-повзунковий механізм (рис. 2, а). Тут використана схема дезаксіального спареного паралелограмного кривошипно-повзункового механізму з ведучим повзунком. Структурно схема цього механізму подібна до попередньої. Ведучий повзунок 1 впливає на хитуні 2 і 6, що з'єднані коромислами 3 і 7 зі стійкою 0. На кінці хитунів шарнірно закріплені ланки 4 і 8, що містять затискні елементи захоплювача. Додані коромисла 5 і 9 утворюють паралелограми і відтворюють плаский рух затискних елементів захоплювача.

*Перший стан – до затискання об'єкта маніпулювання.* Складна, симетрична і напіввідкрита одношарова структурна схема механізму (рис. 2, б) з чотирма базовими ланками 0, 1, 4

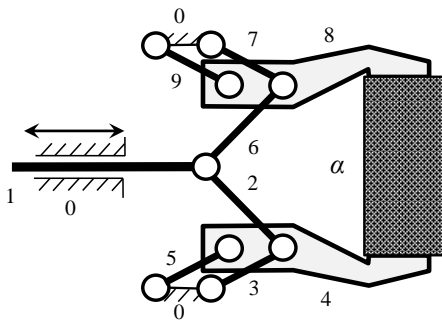
## МАШИНОБУДУВАННЯ

і 8 складається з чотирьох контурів (четвертого класу  $k = 4$ ), має дев'ять рухомих ланок і тринадцять кінематичних пар (у тому числі 3 складних шарніри).

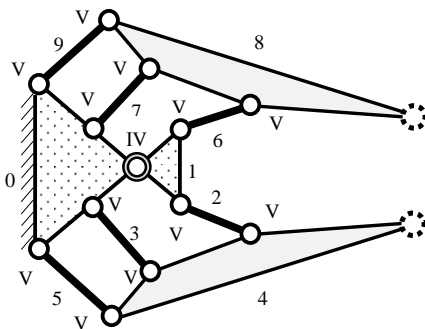
Число ступенів свободи механізму також можна визначити за формулою [3]

$$W = c + b + d, \quad (5)$$

*a – a*



*b – b*



*в – c*

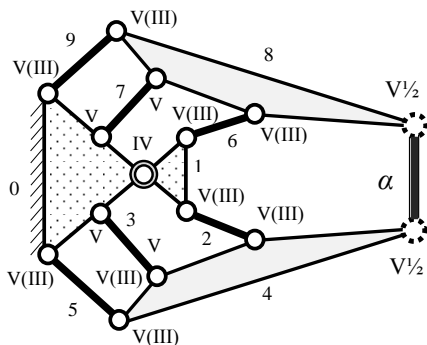


Рис. 2. Кінематична і структурні схеми спареного дезаксіального кривошипно-повзункового механізму захоплювача в різних станах функціонування

Fig. 2. Kinematic and structural diagrams of a paired de-axialized crank-slider gripper mechanism in different states of operation

де  $c$  – число основних рухомостей (відповідає числу рушійних сил);  $b$  – число додаткових рухомостей (з урахуванням місцевих);  $d$  – число динамічних зв'язків. У механізмі одна ведуча ланка і одна рушійна сила, тому  $c = 1$ , додаткових рухомостей і динамічних зв'язків у схемі немає  $b = d = 0$ , тому  $W = 1 + 0 + 0 = 1$ .

Якщо механізм зібраний на однорухомі шарніри і одну циліндричну ведучу пару, то загальна рухливість усіх кінематичних пар складе  $f = 12 \cdot 1 + 1 \cdot 2 = 14$ , а кількість внутрішніх НЗ за формулою (2) буде  $\sigma = 1 + 6 \cdot 4 - 14 = 11$ . У симетричних і однакових двох контурах паралелограмів 0–3–4–5 і 0–7–8–9 утворюються по три НЗ, а в контурах 0–1–3–4–2 та 0–1–7–8–6 – п'ять НЗ, які розподіляються так, як під час розгляду попереднього механізму.

Зменшимо кількість НЗ зниженням класу кінематичних пар. У дужках на рис. 2, *в* наведено можливі для заміни класу кінематичних пар, які забезпечать усунення НЗ у внутрішніх контурах. Сполуки коромисел 5 і 9, а також хитунів 2 і 6 з іншими ланками виконані сферичними шарнірами III класу. Після реалізації цих рекомендацій сумарна рухомість усіх пар складе  $f = 4 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 8 \cdot 3 = 30$ , утворяться п'ять місцевих рухливостей – обертання хитунів 2 і 6, коромисел 5 і 9 та повзунка 1 навколо своїх поздовжніх осей, які додадуться до основної рухомості  $W = 1 + 5 = 6$ , а схема позбудеться всіх внутрішніх НЗ:  $\sigma = 6 + 6 \cdot 4 - 30 = 0$ .

Другий стан – об'єкт маніпулювання затиснутий (рис. 2, *в*). Структура механізму змінилася, і накладені зовнішні в'язі. Кількість зовнішніх НЗ за формулою (3) для  $W_{\text{роб}} = 0$ ,  $W_{\text{ф}} = 1$ ,  $W_{\text{а}} = 6$ ,  $S_{\text{аі}} = 1$ :  $\sigma_{\text{а}} = 11 - [(1 - 0) + 6 - 1] = 5$ , кількість і природа утворення зовнішніх НЗ така ж, як у попередньому випадку, тому можуть бути застосовані ті ж засоби їх усунення.

### Наукова новизна та практична значимість

Уперше виконано структурний аналіз спарених паралелограмних схем захоплювальних пристроїв, які побудовані на основі центрального й дезаксіального кривошипно-повзункових механізмів і мають змінну структуру із зовнішніми однобічними неутримувальними в'язями.

Повний структурний аналіз дозволив розробити практичні рішення щодо зниження класу кінематичних пар для усунення надлишкових зв'язків у внутрішніх контурах та їх зменшення в зовнішніх контурах механізмів захоплювачів зміною форм поверхонь, що контактують, або введенням розвантажувального з'єднання.

### Висновки

Проведено повний структурний аналіз центрального і дезаксіального спарених паралелограмних кривошипно-повзункових механізмів

захоплювальних пристроїв із ведучим повзунком, які є механізмами подвійної структури з внутрішніми та зовнішніми зв'язками.

Виконано поконтурний аналіз, пошук та раціональний структурний синтез механізмів захоплювальних пристроїв із метою зменшення кількості шкідливих надлишкових зв'язків у внутрішніх та зовнішніх контурах механізмів. Реалізація запропонованих рекомендацій з усунення надлишкових зв'язків зробить механізми розглянутих захоплювальних пристроїв самоустановлюваними.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аулін В. В., Гриньків А. В., Деркач О. Д., Макаренко Д. О., Муранов Є. С., Крутоус, Д. І. Підвищення довговічності трибоспряжень застосуванням полімерних композиційних матеріалів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр.* 2022. Вип. 6 (37). Ч. 1. С. 144–156. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2022.6\(37\).1.144-156](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2022.6(37).1.144-156)
2. Дирда В. І., Козуб Ю. Г., Лисиця М. І., Новікова А. В., Філіпенко О. М., Агальцов Г. М. Розрахунок гумометалевих сайлент-блоків при квазістатичному навантаженні. *Геотехнічна механіка*. 2021. № 157. С. 200–211. DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2021.157.200>
3. Озол О. Г. *Основи конструювання и расчета механизмов*. Рига : Звайгзне, 1979. 360 с.
4. Погребняк Р. П. Структурний аналіз і кінематичний синтез стрижньового кулісного механізму захвата. *Підійомно-транспортна техніка*. 2017. № 2 (54). С. 47–56.
5. Погребняк Р. П. Структурний аналіз і кінематичний синтез спареного стрижньового кулісного механізму захвата робота. *Підійомно-транспортна техніка*. 2017. № 4 (56). С. 57–65.
6. Dzedzickis A., Subačiūtė-Žemaitienė J., Šutinyš E., Samukaitė-Bubnienė U., Bučinskas V. Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 1. P. 135–160. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12010135>
7. Hughes J., Culha U., Giardina F., Guenther F., Rosendo A., Iida F. Soft Manipulators and Grippers: A Review. *Frontiers in Robotics and AI*. 2016. Vol. 3. Art. 69. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00069>
8. Protsenko V., Babiy M., Nastasenko V., Protasov R. Marine diesel high pressure fuel pump driving failure analysis. *Strojnícky časopis – Journal of mechanical engineering*. 2021. Vol. 71, No. 2. P. 213–220. DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2021-0031>
9. Protsenko V., Babiy M., Nastasenko V., Protasov R. Marine ram-type steering gears maintainability increasing. *Strojnícky časopis – Journal of mechanical engineering*. 2022. Vol. 72, No. 2. P. 149–160. DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0025>
10. Reshetov L. *Self-Aligning Mechanisms*. Mir Publishers, 1986. 528 p.
11. Zalyubovs'kyi M. G., Panasyuk I. V., Koshel' S. O., Koshel' G. V. Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine. *International Applied Mechanics*. 2021. Vol. 57, No. 4. P. 466–476. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10778-021-01098-y>
12. Zdanevich S. S., Pogrebnyak R. P., Zdanevich S. V. Structural analysis and rational design of mechanisms of crossroll tube straightening machines. *Science and Transport Progress*. 2018. № 5 (77). P. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147630>
13. Zhang B., Xie Y., Zhou J., Wang K., Zhang Z. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 177. P. 177–191. Art. 105694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105694>

R. P. POHREBNIAK<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. of Higher Mathematics, Physics and General Engineering Disciplines, Dnipro State Agrarian and Economic University, Serhii Efremov Str., 25, Dnipro, Ukraine, 49009, tel. +38 (095) 499 75 54, e-mail pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

## Rational Structural Synthesis of Schemes of Crank-Slider Mechanisms of Gripping Devices

**Purpose.** The study is devoted to the determination of harmful redundant connections (RC) in the internal and external circuits of grippers based on paired schemes of crank-slider mechanisms. **Methodology.** The determination of redundant (repeated) connections was carried out using the universal structural theory of mechanisms. **Findings.** Mechanisms without redundant links, including gripper mechanisms, are more reliable, have a higher efficiency in operation, and are statically determined. Rational design of such mechanisms without a thorough structural analysis is difficult. In gripping devices, the determination of redundant connections in the contours of the mechanisms occurs at two different stages of their functioning: before clamping the object of manipulation and after. Such mechanisms of variable structure require an appropriate double structural analysis, the main purpose of which is to determine the repetitive connections at each of these stages. This structural analysis allowed us to determine the number and location of internal and external redundant links. The search for redundant bonds at the second stage of gripper operation, when new circuits in the mechanisms are formed, requires the use of an external structural formula. The elimination of redundant links in the internal contours of the mechanisms was accomplished by lowering the class of kinematic pairs. Reliable determination of the number of redundant links in the external circuits is possible only taking into account the fineness of the non-holding links. **Originality.** For the first time, a structural analysis of paired parallel-frame schemes of grippers based on the central and desaxial crank-slider mechanisms and having a variable structure with external one-sided non-retaining ties was performed. **Practical value.** The obtained research results made it possible to determine the location of internal and external redundant bonds in the contours of the mechanisms and to propose actions to reduce the number of harmful redundant bonds in the external contour of the mechanisms. The elimination of frictional excessive connections in the outer contour of the mechanisms by changing the shapes of the contacting surfaces of the clamping elements of the gripper was carried out.

**Keywords:** structural analysis of the mechanism; mechanism mobility; excessive connections (EC); external connections; one-sided links

### REFERENCES

1. Aulin, V., Grinkiv, A., Derkach, O., Makarenko, D., Muranov, Y., & Krutous, D. (2022). Increasing the Durability of Tribocouplers Using Polymer Composite Materials. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 6(37), 144-156. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2022.6\(37\).1.144-156](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2022.6(37).1.144-156) (in Ukrainian)
2. Dyrda, V. I., Kozub, Yu. H., Lysytsia, M. I., Novikova, A. V., Filipenko, O. M. & Ahaltsov, H. M. (2021) Calculation of rubber-metal silent-blocks under quasi-static loading. *Geo-Technical Mechanics*, 157, 200-211. DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2021.157.200> (in Ukrainian)
3. Ozol, O. G. (1979). *Osnovy konstruirovaniya i rascheta mekhanizmov*. Riga: Zvaygzne. (in Russian)
4. Pogrebnyak, R. P. (2017). Strukturnyi analiz i kinematychnyi syntezy sparenoho stryzhnovoho kulisnogo mekhanizmu zakhvata robota. *Hoisting and conveying equipment*, 2(54), 47-56. (in Ukrainian)
5. Dzedzickis, A., Subačiūtė-Žemaitienė, J., Šutinys, E., Samukaitė-Bubnienė, U., & Bučinskas, V. (2021). Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities. *Applied Sciences*, 12(1), 135-160. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12010135> (in English)
6. Hughes, J., Culha, U., Giardina, F., Guenther, F., Rosendo, A., & Iida, F. (2016). Soft Manipulators and Grippers: A Review. *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00069> (in English)
7. Protsenko, V., Babiy, M., Nastasenکو, V., & Protasov, R. (2021). Marine Diesel High Pressure Fuel Pump Driving Failure Analysis. *Strojnícky Časopis – Journal of Mechanical Engineering*, 71(2), 213-220. DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2021-0031> (in English)
8. Protsenko, V., Nastasenکو, V., Babiy, M., & Protasov, R. (2022). Marine Ram-Type Steering Gears Maintainability Increasing. *Strojnícky Časopis – Journal of Mechanical Engineering*, 72(2), 149-160. DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0025> (in English)

9. Reshetov, L. (1986). *Self-Aligning Mechanisms*. Mir Publishers. (in English)
10. Zalyubovs'kyi, M. G., Panasyuk, I. V., Koshelev, S. O., & Koshelev, G. V. (2021). Synthesis and Analysis of Redundant-Free Seven-Link Spatial Mechanisms of Part Processing Machine. *International Applied Mechanics*, 57(4), 466-476. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10778-021-01098-y> (in English)
11. Zdanevich, S. S., Pogrebnyak, R. P., & Zdanevich, S. V. (2018). Structural analysis and rational design of mechanisms of cross-roll tube straightening machines. *Science and Transport Progress*, 5(77), 65-73. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147630> (in English)
12. Zhang, B., Xie, Y., Zhou, J., Wang, K., & Zhang, Z. (2020). State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105694> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.02.2025

Прийнята до друку: 20.06.2025

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 656.216.2:[656.13:33.054.23]

М. Б. КУРГАН<sup>1\*</sup>, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ<sup>2</sup>, Р. В. ІВАНОВ<sup>3</sup>, А. М. КУРГАН<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта oleg.luzhickii@gmail.com, ORCID 0000-0001-6519-7447

<sup>3</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта ivanovrodion@ukr.net, ORCID 0009-0005-9125-9468

<sup>4</sup>ДП «Науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства Укрзалізниці», вул. Любарського, 181, Дніпро, Україна, 49034, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kudl82@ukr.net, ORCID 0009-0005-2527-7502

### Оцінка економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах

**Мета.** Визначення економічних втрат від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах вимагає комплексного підходу. Автори ставлять за мету розробити методику розрахунків економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах з інтенсивним рухом транспортних засобів та запропонувати раціональні рішення щодо доцільності модернізації переїздів. **Методика.** У розрахунках економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах беруть до уваги категорію переїзду, кількість поїздів і кількість транспортних засобів різних категорій, що перетинають переїзд упродовж доби, інші фактори, включені до автоматизованої системи «Переїзд». Методика враховує економічну вартість втрат часу пасажирів, що простоюють у легковому транспорті й автобусах перед закритим переїздом, а також економічну вартість простою вантажу залежно від типу вантажних автомобілів і роду перевезень. **Результати.** У ході дослідження автори встановили, на яких переїздах і за якої інтенсивності транспортних засобів спостерігаються найбільші економічні втрати від непродуктивних простоїв. Отримані результати враховують добову інтенсивність руху на переїзді: кількість поїздів і кількість транспортних засобів різних категорій, категорію переїздів та інші фактори. З'ясовано, як інтенсивність руху автотранспорту та залізничного транспорту, частота відкриття шлагбаумів, тривалість простою легкових автомобілів, автобусів, вантажних автомобілів впливають на витрати і вартість пального під час роботи двигунів на холостому ходу. Оцінено негативний вплив непродуктивних простоїв транспорту на довкілля. **Наукова новизна.** У роботі запропоновано методику оцінки економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах із найбільш інтенсивним рухом. Оцінку економічних втрат автотранспорту проведено шляхом аналізу низки факторів, пов'язаних із транспортним потоком, тривалістю простоїв, витратами пального, втраченим часом, а також забрудненням довкілля. **Практична значимість.** Розроблена методика дає можливість оцінювати економічні втрати автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах, що підтверджено прикладами з експлуатації переїздів на напрямках регіональної філії «Придніпровська залізниця».

**Ключові слова:** переїзд; транспортний потік; простій транспортного засобу; економічні втрати; інтенсивність руху; вплив транспорту на довкілля; автоматизована інформаційна система «Переїзд»

#### Вступ

Проблема непродуктивних простоїв автотранспорту на залізничних переїздах є актуальною для багатьох країн світу, зокрема і для України. Ці простой призводять до значних економічних

втрат, пов'язаних зі збільшенням витрат пального, зносом транспортних засобів, марнуванням часу водіїв та, як наслідок, зниженням їхньої продуктивності.

Для зведення цієї проблеми до мінімуму вживають певних заходів. Найкращі рішення –

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

перетин доріг через шляхопроводи та підземні переходи. Однак є велика кількість автомобільно-залізничних переїздів, які навряд чи будуть дворівневими, тому що їх реконструкція вимагає значних капіталовкладень.

Перетини залізниць і автодоріг в одному рівні (залізничні переїзди) слід сприймати як необхідність та вживати всіх доступних заходів, щоб зменшити негативні наслідки. Проблеми, пов'язані з наявністю залізничних переїздів, численні. На залізничних переїздах відбувається порушення безперервності руху автотранспорту, а в ряді випадків і залізничного транспорту, що призводить до підвищеного енергоспоживання, забруднення довкілля, втрат часу пасажирів та персоналу, збільшення часу залучення рухомого складу, зниження пропускної спроможності. До негативних наслідків також належать витрати на утримання залізничного переїзду та витрати, пов'язані з деякими інвестиційними проектами [2].

Проблема розв'язки в одному рівні призводить до дорожньо-транспортних пригод із тяжкими наслідками, неефективного простою автомобілів у заторах та додаткових витрат залізниці. Для формування вартісної оцінки проектних рішень враховують лише кошти на будівництво, а економічним втратам на державному рівні, як правило, не приділяють достатньо уваги.

Ця проблема потребує більш детального вивчення. Якщо фінансові і матеріально-технічні ресурси обмежені, то виникає питання, куди їх потрібно спрямувати, – на будівництво декількох шляхопроводів чи модернізацію декількох десятків переїздів, і які саме переїзди підлягають заміні.

Непродуктивні простої автотранспорту на залізничних переїздах призводять до значних економічних втрат, зниження ефективності транспортної системи та погіршення екологічної ситуації. Фактори, що впливають на величину втрат, такі:

- інтенсивність руху автотранспорту та залізничного транспорту: чим більший обсяг руху, тим частіше виникають ситуації, коли автомобілі змушені очікувати відкриття шлагбаума;
- частота відкриття шлагбаумів: тривалість очікування безпосередньо залежить від того, як часто відкривають шлагбаум для пропуску залізничного транспорту;

- тривалість простою одного автомобіля: середній час, який автомобіль витрачає на очікування, впливає на загальні втрати часу та пального;

- вартість пального та часу: ці показники визначають прямі економічні втрати від простою;

- непрямі витрати: додаткові витрати, пов'язані зі зносом транспортних засобів, підвищеним рівнем стресу водіїв та негативним впливом на довкілля.

Оцінку економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах здійснюють шляхом аналізу низки факторів, пов'язаних із транспортним потоком, тривалістю простоїв, витратами пального, втраченим часом, а також забрудненням довкілля. Можливі такі шляхи зменшення економічних втрат:

- оптимізація роботи залізничних переїздів: установлення сучасних систем управління рухом, збільшення кількості переїздів, будівництво шляхопроводів або тунелів;

- розвиток альтернативних маршрутів: створення нових доріг та об'їзних шляхів для зменшення навантаження на залізничні переїзди;

- інформування водіїв: надання водіям актуальної інформації про стан дорожнього руху та можливі затори на залізничних переїздах;

- упровадження інтелектуальних транспортних систем: використання технологій, що дозволяють оптимізувати рух транспорту та мінімізувати простої.

Оцінка економічних втрат від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах є складним завданням, яке вимагає комплексного підходу.

Сучасні дослідження у сфері вдосконалення залізничних переїздів демонструють багатовекторний підхід до дотримання їх безпечності та ефективності. Зокрема, значну увагу приділяють оптимізації часу роботи переїздів, автоматизації управління, використанню відновлюваних джерел енергії, інтелектуальних транспортних систем та оцінці ризиків. На прикладі Південної Африки запропоновано числовий підхід до регулювання графіків руху, що дозволяє зменшити затримки до 50 % за рахунок упровадження динамічного алгоритму управління переїздом [13]. Це має безпосередній вплив на економічні втрати автотранспорту, оскільки скорочення часу простою знижує витрати пального, втрати

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

часу водіїв та ризику запізнь у логістичних процесах.

У дотичному руслі перебуває модель оцінки ризику зіткнень на безлюдних переїздах із використанням штучного інтелекту [11]. Запропоноване поєднання статистичних методів дозволяє виявити конфігурації переїздів, що найбільше впливають на ризики, серед яких – обмежена оглядовість, кут перетину та стан покриття. Зниження частоти аварій опосередковано зменшує не лише втрати життя, а й тривалість перекриття переїзду, що важливо для оцінки непродуктивних втрат автотранспортних перевезень.

Актуальним є також підхід до моделювання добових затримок залежно від типу переїзду, інтенсивності руху та заходів безпеки. Дослідження з Флориди показало, що навіть після модернізації переїзди можуть залишатися «вузькими місцями» транспортної інфраструктури, особливо в умовах високого трафіку [10]. Така інформація є цінною для подальшого економічного моделювання втрат від простою, оскільки дозволяє проводити оцінку на основі локальних даних.

Ще одним підходом є використання мікросимуляцій у програмному середовищі VISSIM для оцінки впливу світлофорного регулювання поблизу переїздів. Було встановлено, що пріоритетне керування світлофорами значно зменшує утворення заторів у критичних точках дорожньої мережі [5]. Це дає підстави вважати, що технічні рішення, які навіть частково зменшують час затримки, мають відчутний економічний ефект – особливо в умовах міського середовища з високою щільністю руху.

Із технічної точки зору, надзвичайно перспективним є впровадження гібридного енергоживлення для систем автоматизації переїздів, як показано на прикладі Бангладеш [14]. Системи, що базуються на сонячній і вітровій енергії, забезпечують безперебійне живлення, що критично для уникнення збоїв, які спричиняють тривалі простої автотранспорту. Надійність роботи переїзду безпосередньо корелює з рівнем непродуктивних втрат – як у пальному, так і в часі.

Дослідження [8] присвячене оцінці втрат часу автотранспорту на залізничних переїздах у малозабезпечених районах Чикаго та аналізу ефективності нематеріальних заходів мінімізації цих простоїв. Із використанням транспортної

моделі INTEGRATION змодельовано п'ять сценаріїв, що відображають різний рівень доступу водіїв до оперативної інформації про закриття переїздів. Результати показали, що за відсутності інформування сукупні простої сягають 954 години за шість годин пікового навантаження, тоді як оновлення даних що 2 хвилини дозволяє скоротити ці втрати на 750 годин. Водночас встановлено, що традиційні методи оцінки недооцінюють ці затримки на понад 70 %. Отримані дані свідчать про суттєві економічні втрати автотранспорту через непродуктивні простої та підтверджують доцільність впровадження цифрових інформаційних систем як ефективного заходу зменшення затримок без дорогих інфраструктурних рішень.

У ряді досліджень безпеку руху на залізничних переїздах визначено як один із ключових факторів, що впливає на загальну ефективність транспортної інфраструктури. Акцентовано увагу на тому, що порушення правил дорожнього руху, зниження технічної надійності засобів регулювання, а також недостатнє інженерне облаштування переїздів є основними причинами підвищеної аварійності. Запропоновано застосування різноманітних методів виявлення небезпечних ділянок, зокрема балів, коефіцієнтів аварійності, аналізу конфліктних ситуацій тощо. У контексті зростання інтенсивності руху підкреслено, що навіть без безпосереднього виникнення ДТП переїзди часто стають «вузькими місцями», які зумовлюють утворення заторів і вимушені зупинки автотранспорту. Такі прояви системної нестабільності створюють передумови до подальшого аналізу впливу простоїв на втрати часу й ресурсів, що особливо актуалізується в сучасних умовах зростання логістичних навантажень [3].

Стаття [7] присвячена формалізації економічної оцінки транспортних проєктів на основі аналізу витрат і вигод (СВА). Автори пропонують аналітичну модель, що враховує як грошові, так і часові складові узагальненої ціни транспорту, зосереджуючись на оцінці соціальних вигод від проєктів, зокрема економії часу. Розглянуто два підходи до СВА: на основі змін надлишків споживачів і виробників та через різницю між готовністю до сплати (WTP) і використаними ресурсами. Надано практичні рекомендації для

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

уникнення типових помилок: подвійного рахунку, некоректного застосування тінювих цін та ігнорування ринкових спотворень. Особливу увагу приділено ширшим економічним вигодам (WEBs), таким як агломераційні ефекти й податкові впливи, із застереженням щодо їх обмеженого використання. Стаття завершується емпіричним прикладом, що ілюструє еквівалентність різних методів оцінки за умови дотримання логічної послідовності.

У дослідженні [6] запропоновано метод динамічної просторово-часової сегментації дорожнього руху з використанням алгоритму geohash, що дозволяє з високою точністю виявляти нестабільні ділянки зниження швидкості, зокрема в зонах злиття/розгалуження та після ДТП. На основі даних тахографів вантажного транспорту проаналізовано понад 1 200 сегментів на автомагістралях Південної Кореї, із яких понад 900 виявлено як нестабільні. Методика враховує варіативність швидкості в кожному сегменті і дозволяє визначати зони ризику та впливу аварій у реальному часі. Попри орієнтацію на автомагістралі, підхід є релевантним і для виявлення зон непродуктивного простою на залізничних переїздах, де затримки автотранспорту можна кількісно оцінити для подальших економічних розрахунків.

У дослідженні [9] проаналізовано вплив залізничних переїздів на рівень викидів шкідливих речовин легковими автомобілями в умовах міського руху. Зокрема за допомогою портативної системи PEMS було оцінено різні сценарії проїзду через переїзд: без зупинки, із зупинкою з працюючим або вимкненим двигуном, а також за альтернативним маршрутом. Результати засвідчили, що навіть довший маршрут може забезпечити коротший час поїздки, якщо уникнути очікування на закритому переїзді, хоча екологічна ефективність залежить від режимів роботи двигуна, оскільки збільшення навантаження в разі об'їзду зумовлює вищі викиди CO, NO<sub>x</sub> і HC. Зазначені висновки мають безпосередній зв'язок із темою оцінки економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах, адже затримки не лише подовжують тривалість поїздки, але й спричиняють додаткові витрати пального та екологічне навантаження. Таким чином, дослідження підт-

верджує доцільність аналізу альтернативних маршрутів та впровадження систем інформування водіїв у режимі реального часу з метою зниження загальних втрат, пов'язаних із простоем автотранспорту на переїздах.

Узагальнюючи викладене, можемо стверджувати, що затримки на залізничних переїздах є джерелом значних економічних втрат. Їх мінімізація можлива завдяки впровадженню інноваційних рішень, гнучкому регулюванню руху та комплексному плануванню модернізації інфраструктури.

### Мета

Автори дослідження мають на меті розвинути методику оцінки економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах з інтенсивним рухом транспортних засобів та запропонувати раціональні рішення щодо доцільності модернізації переїздів.

### Методика

Оцінка втрат від простою на залізничних переїздах пасажирського й вантажного транспорту передбачає аналіз часу, витраченого на очікування, та його економічну вартість, що враховує середню кількість пасажирів у транспорті, середню тривалість простою, а також вартість часу пасажирів. На основі аналізу літературних даних [1, 12] наведено методику оцінки втрат від простою на залізничних переїздах транспортних засобів.

Основні етапи розрахунку передбачають збір вихідних даних та визначення інтенсивності руху автомобілів: кількість транспортних засобів, які проїжджають через переїзд протягом доби, поділена за категоріями (легкові, вантажні, автобуси).

Загальну кількість транспортних засобів  $N_{\text{тз}}$  одиниць/добу наведено в паспорті переїзду автоматизованої інформаційної системи «Переїзд», із них автобуси  $N_{\text{автоб}}$ .

Оскільки в паспорті переїзду не зазначена кількість вантажних транспортних засобів, до в дослідженні взято:

$$N_{\text{вант}} = N_{\text{тз}} \cdot \delta,$$

де  $\delta$  – відсоток вантажних автомобілів.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Кількість легкових автомобілів визначають як  $N_{\text{легк}} = N_{\text{тз}} - N_{\text{автоб}} - N_{\text{вант}}$ .

У паспорті також вказана середня кількість поїздів, що проходять через переїзд за добу,  $N_{\text{поїздів}}$ .

Пропонуємо таку послідовність розрахунків:

1. Кількість транспортних засобів, що простоюють на переїзді. Загальну кількість закриттів переїзду можна визначити за формулою:

$$N_{\text{закр}} = N_{\text{поїздів}} \cdot k_{\text{корег}} \quad (1)$$

У формулі (1)  $k_{\text{корег}}$  – корегувальний коефіцієнт, що враховує характер руху поїздів. Якщо поїзди йдуть із фіксованим інтервалом, тоді кількість закриттів приблизно дорівнює кількості поїздів ( $k_{\text{корег}} \approx 1$ ). Якщо кілька поїздів слідує групою, наприклад, 2–3 поїзди під час одного закриття, то коефіцієнт буде  $k_{\text{корег}} < 1$ .

Загальну тривалість закриття переїзду (год/добу) розраховують як:

$$T_{\text{закр}} = \frac{N_{\text{закр}} \cdot t_{\text{закр}}}{60}, \quad (2)$$

де  $t_{\text{закр}}$  – середня тривалість закриття переїзду для проходження одного поїзда.

Відповідно до Інструкції з улаштування та експлуатації залізничних переїздів [4], шлагбаум автоматично піднімається після проходження поїзда та звільнення переїзду його хвостом. Це означає, що тривалість закриття безпосередньо пов'язана з часом, необхідним для повного проходження поїзда через переїзд. Середня тривалість закриття залізничного переїзду для проходження одного поїзда зазвичай становить від 3 до 5 хвилин. Цей час залежить від кількох факторів: швидкість і довжина поїзда, тип сигналізації та автоматизації, інтенсивність руху.

Кількість транспортних засобів, що простоюють на переїзді ( $N_{\text{тз,пр}}$ ), визначають на основі інтенсивності руху транспорту через переїзд (один./добу) і загальної тривалості закриття переїзду (формула 2):

$$N_{\text{тз,пр}} = N_{\text{інтенс}} \cdot T_{\text{закр}} \cdot k_{\text{накопич}}, \quad (3)$$

де  $N_{\text{інтенс}}$  – інтенсивність руху транспорту (один./год),  $N_{\text{інтенс}} = \frac{N_{\text{тз}}}{24}$ ;  $k_{\text{накопич}}$  – коефіцієнт накопичення транспорту (враховує нерівномірність підходу транспорту до переїзду, зазвичай  $k_{\text{накопич}} = 1,2 - 1,5$ ).

Розподіл простою транспорту на переїзді, з формули (3) за типами транспортних засобів можна представити такими формулами:

– простій автобусів:

$$N_{\text{автоб,пр}} = \frac{N_{\text{тз,пр}} \cdot N_{\text{автоб}}}{N_{\text{тз}}};$$

– простій вантажних автомобілів:

$$N_{\text{вант,пр}} = \frac{N_{\text{тз,пр}} \cdot N_{\text{вант}}}{N_{\text{тз}}};$$

– простій легкового транспорту:

$$N_{\text{легк,пр}} = N_{\text{тз,пр}} - N_{\text{автоб,пр}} - N_{\text{вант,пр}}.$$

Простій транспорту на переїзді призводить до втрат, пов'язаних із простоєм пасажирів і вантажів, втратою пального під час роботи двигунів на холостому ході і негативним впливом на навколишнє середовище.

2. Економічна оцінка втрат часу пасажирів. Кількість пасажирів, які простоюють, визначають як добуток кількості транспортних засобів та середньої кількості пасажирів у транспортному засобі:

$$N_{\text{прост}}^{\text{пас}} = N_{\text{легк,пр}} \cdot P_{\text{легк}} + N_{\text{автоб,пр}} \cdot P_{\text{автоб}},$$

де  $N_{\text{легк}}^{\text{пас}}$ ,  $N_{\text{автоб}}^{\text{пас}}$  – загальна кількість пасажирів, які простоюють відповідно в легковому транспорті та автобусах (осіб/добу);  $P_{\text{легк}}$ ,  $P_{\text{автоб}}$  – середня кількість пасажирів у транспортному засобі: для легкового автомобіля середнє завантаження – 1,5 пас./авто; для маршрутних транспортних засобів на базі «Ford Transit», «Mercedes Sprinter», «Рутаї» – 12–18 пасажирів, на базі «Богдан А092», «Еталон» – 20–30 пасажирів; для міських автобусів – 25–40 пас./автобус; для приміських автобусів – 30...50 пас./автобус.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Економічну вартість втрат пасажирів  $B_{\text{пас}}$  (грн/рік), що простоюють у легковому транспорті й автобусах перед закритим переїздом, визначають за формулою:

$$B_{\text{пас}} = 365 \cdot N_{\text{прост}}^{\text{пас}} \cdot T_{\text{закр}} \cdot C_{\text{час}}, \quad (4)$$

де  $C_{\text{час}}$  – вартість часу одного пасажирів (грн/год). За офіційними методиками Світового банку та Мінекономіки України, середня економічна вартість часу пасажирів може становити 50–60 грн.

3. *Середні витрати пального на холостому ходу.* Середні витрати палива на холостому ходу  $C_{\text{пал}}$  (л/добу) можна розрахувати так:

$$C_{\text{пал}} = \left( \begin{array}{l} N_{\text{легк,пр}} \cdot Q_{\text{легк}} + N_{\text{авт,пр}} \cdot Q_{\text{авт}} + \\ + N_{\text{вант,пр}} \cdot Q_{\text{вант}} \end{array} \right) \cdot T_{\text{закр}},$$

де  $Q_{\text{легк}}$ ,  $Q_{\text{авт}}$  – витрати пального, що залежать від об'єму двигуна (для легкових автомобілів 0,8...1,5 л/год; для маршрутних 1,5...2,0 л/год; для автобусів 3...5 л/год);  $Q_{\text{вант}}$  – середні витрати пального вантажного транспорту, що залежать від його типу, об'єму двигуна й типу пального (для малотоннажних вантажних засобів типу «Ford Transit», «Mercedes Sprinter», ГАЗель 1,5...2,5 л/год; для середньотоннажних (МАЗ, ЗІЛ, IVECO, DAF) середнього класу – 2,5...4,5 л/год; для великотоннажних вантажних автомобілів та фур (DAF XF, MAN TGX, «Scania», «Volvo FH») – 4,5...8,0 л/год).

Вартість витраченого пального від простою транспортних засобів (грн/рік) становить:

$$B_{\text{пал}} = 365 \cdot C_{\text{пал}} \cdot P_{\text{пал}}, \quad (5)$$

де  $P_{\text{пал}}$  – ціна 1 літра пального. Станом на 1 лютого 2025 року середні ціни на пальне в Україні становлять: бензин А–95 – 56,86 грн/л, дизельне пальне – 55,13 грн/л, автомобільний газ (LPG) – 37,10 грн/л.

4. *Економічна вартість простою вантажу.* Цей параметр залежить від типу вантажу (швидкопсувний, промисловий тощо) і становить:

$$B_{\text{тов}} = 365 \cdot N_{\text{вант,пр}} \cdot q_{\text{сер}} \cdot T_{\text{закр}} \cdot P_{\text{тов}} \cdot \gamma_{\text{відс}}, \quad (6)$$

де  $q_{\text{сер}}$  – середня маса вантажу, яку беруть залежно від типу вантажного транспорту і роду перевезень (середньотоннажний вантажний транспортр (від 3,5 до 12 т повної маси), типові моделі MAN TGL, «Iveco Eucargo», Богдан 5316, КраЗ–5401Н2, корисне навантаження 2...6 т; важкий вантажний транспорт (від 12 до 40 т повної маси), типові моделі «Volvo FH», «Scania R-series», MAN TGX, DAF XF – корисне навантаження (18...24 т);  $P_{\text{тов}}$  – орієнтовна вартість вантажів, грн/т (будматеріали (пісок, щебінь) – 400...1 000, аграрні вантажі – 5 000...8 000, нафтопродукти – 35 000...50 000, продукти харчування – 20 000...60 000);  $\gamma_{\text{відс}}$  – економічні втрати від простою вантажного транспорту, залежать від типу вантажу, вартості вантажу за годину (будівельні матеріали – 0,1...0,5 %/год (для бетону 1...5 %/год); нафтопродукти – 0,2...1 %/год; аграрні вантажі – 0,5...2 %/год; харчові продукти – 2...5 %/год).

5. *Оцінка втрат від забруднення довкілля.* Вона базується на розрахунках викидів парникових газів (переважно  $\text{CO}_2$ ) від автомобільного транспорту на холостому ходу, які спричиняють увімкнені двигуни під час очікування.

Середні викиди забруднювальних речовин від вантажних автомобілів на 1 літр дизельного пального залежать від класу екологічності двигуна. Оскільки на дорогах України більшість транспорту відповідає Euro 3 / Euro 4, наведемо середні викиди  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  і  $\text{PM}_{2.5}$  для цих класів, табл. 1.

Для порівняння, у багатьох європейських країнах ставки податку на викиди  $\text{CO}_2$  значно вищі. Наприклад, у Швеції цей податок становить близько 137 доларів США за тону  $\text{CO}_2$ , у Швейцарії – приблизно 99 доларів США за тону. Це відповідає діапазону від 1 500 до 3 500 грн за тону  $\text{CO}_2$  (див. табл. 1). Такі високі ставки спрямовані на стимулювання зменшення викидів парникових газів та перехід до більш екологічно чистих технологій.

Таблиця 1

## Середні викиди на 1 літр пального та екологічні податки на викиди

Table 1

## Average emissions per liter of fuel and environmental taxes on emissions

Тип рухомого складу	CO <sub>2</sub> (вуглекислий газ)	NO <sub>x</sub> (оксиди азоту)	PM2.5 (тверді частки діаметром <2.5 мкм)
Легкові автомобілі ( $k_{\text{легк}}$ )	2,6...2,7 кг/л	2,0...5,0 г/л	0,02...0,05 г/л
Автобуси ( $k_{\text{авт}}$ )	2,6...2,7 кг/л	5,0...10,0 г/л	0,05...0,15 г/л
Вантажні автомобілі ( $k_{\text{вант}}$ )	2,6...2,7 кг/л	6,0...12,0 г/л	0,05...0,20 г/л
Світові екологічні тарифи ( $P$ )	1 500...3 500 грн/т	150...160 тис. грн/т	0,6...2,0 млн грн/т

Примітка:

CO<sub>2</sub> практично не змінюється між класами Euro, оскільки прямо пропорційний витраті пального (~2,65 кг на 1 л).

NO<sub>x</sub> суттєво знижується після Euro 4 через упровадження систем EGR (рециркуляція вихлопних газів).

PM2.5 (тверді частки) у маршрутних та вантажних автомобілів значно вищі через відсутність DPF (сажових фільтрів) на більшості транспортних засобів класу Euro 3 / Euro 4.

Станом на 1 січня 2022 року в Україні ставка податку на викиди CO<sub>2</sub> дорівнювала 30 грн за тону CO<sub>2</sub>, що еквівалентно приблизно 1 долару США. В Україні ставка залишається однією

з найнижчих у Європі. Поступове підвищення ставок в Україні може сприяти інтеграції до європейського ринку та наблизитися до міжнародних екологічних стандартів.

В Україні викиди оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) та дрібнодисперсних твердих частинок (PM2.5) є об'єктом моніторингу та регулювання, оскільки вони суттєво впливають на якість атмосферного повітря та здоров'я населення. На сьогодні не встановлено єдиної національної ставки податку або плати за викиди NO<sub>x</sub> та PM2.5. Однак підприємства, що здійснюють викиди цих речовин, зобов'язані мати відповідні дозволи та дотримуватися встановлених нормативів гранично допустимих викидів.

Докладно зупинимося на розрахунку тільки викидів  $E_{CO_2}$  транспортними засобами, що простояють на переїзді перед закритим шлягбаумом, і наведемо вартісну оцінку втрат від транспортних засобів за рік.

Розрахунок викидів  $E_{CO_2}$ :

$$E_{CO_2} = T_{\text{закр}} \cdot k_{CO_2} \left( N_{\text{легк,пр}} \cdot Q_{\text{легк}} + N_{\text{автоб,пр}} \cdot Q_{\text{автоб}} + N_{\text{вант,пр}} \cdot Q_{\text{вант}} \right)$$

Вартісна оцінка екологічних втрат від транспортних засобів:

$$B_{\text{екол}} = 365 \cdot E_{CO_2} \cdot P_{CO_2}, \quad (7)$$

де  $k_{CO_2}$  – середні викиди на 1 літр пального (табл. 1);  $P_{CO_2}$  – середня вартість компенсації за 1 тону викидів CO<sub>2</sub> (табл. 1).

Загальні втрати від простою транспортних засобів на залізничному переїзді визначають як суму всіх складових – формули (4–7):

$$B = B_{\text{пас}} + B_{\text{нал}} + B_{\text{тов}} + B_{\text{екол}}. \quad (8)$$

## Результати

Наведемо приклади оцінки економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простояв на декількох переїздах регіональної філії

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

«Придніпровська залізниця».

Приклад 1. Вихідні дані: кількість поїздів на добу  $N_{\text{поїздів}} = 85$ , кількість транспортних засобів  $N_{\text{тз}} = 4\,234$ , із них автобусів  $N_{\text{автоб}} = 43$ .

Кількість інших транспортних засобів наведена в табл. 2, а результати розрахунків представлено на рис. 2.

Таблиця 2

**Кількість транспортних засобів для різних варіантів (приклад 1)**

Table 2

**Number of vehicles for different options (example 1)**

Тип транспорту	Відсоток вантажного транспорту, %		
	10	20	30
Вантажний ( $N_{\text{вант}}$ )	423	847	1 270

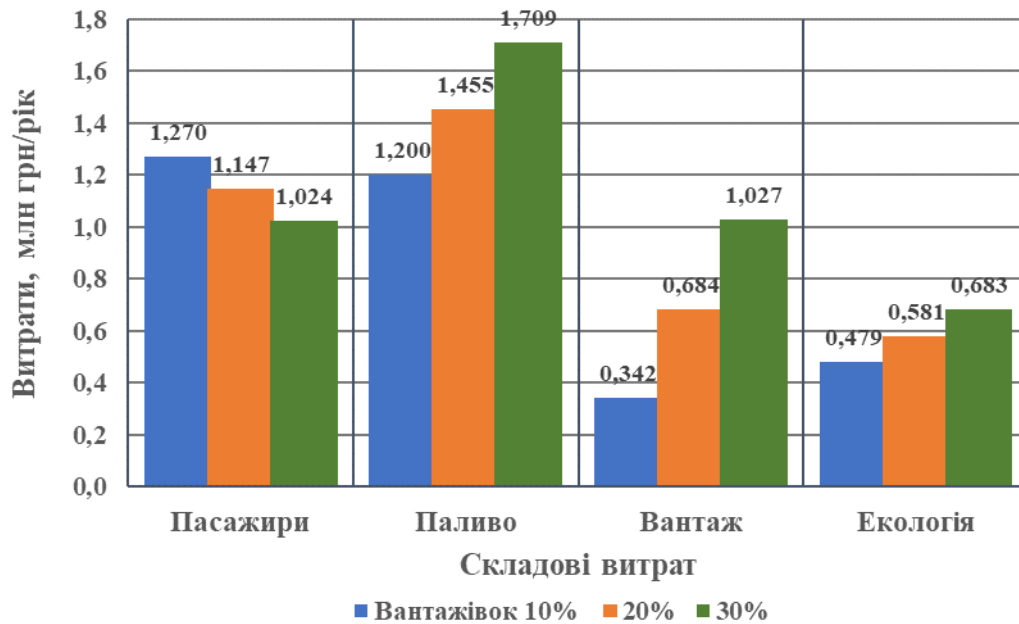


Рис. 1. Економічні втрати автотранспорту від непродуктивних простоїв на переїзді (П'ятихатки – Чаплине)

Fig. 1. Economic losses of motor transport due to unproductive downtime at the crossing (Pyatikhatky – Chaplyne)

Легковий ( $N_{\text{легк}}$ )	3 768	3 344	2 921
--------------------------------	-------	-------	-------

У розрахунках узято: час закриття переїзду  $t_{\text{закр}} = 3$  хвилини, середні витрати палива  $Q_{\text{легк}} = 1,2$  л/год,  $Q_{\text{автоб}} = 3,0$  л/год,  $Q_{\text{вант}} = 4,5$  л/год, вартість часу пасажирів  $C_{\text{год}} = 50$  грн/год.

Отримані результати розрахунків за формулами (4–7) представлено у вигляді гістограми, рис. 1, 2.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Загальні втрати від простою транспортних засобів (формула 8) склали від 3,3 до 4,4 млн грн/рік залежно від кількості вантажних транспортних засобів. Найбільші втрати пов'язані з витратами пального (36,5–38,5 %). Витрати від простою пасажирів склали 38,6–23,2 %, простою вантажу 10,4–23,1 %, забрудненням навколишнього середовища 14,6–15,4 % від загальних втрат.

*Приклад 2.* Вихідні дані для переїзду з більш високою інтенсивністю руху:  $N_{\text{поїздів}} = 134$ , кількість транспортних засобів  $N_{\text{тз}} = 10\,264$ , із них автобусів  $N_{\text{автоб}} = 937$ . Кількість інших транспортних засобів наведена в табл. 3, а результати розрахунків представлено на рис. 2.

Таблиця 3

## Кількість транспортних засобів для різних варіантів (приклад 2)

Table 3

## Number of vehicles for different options (example 2)

Тип транспорту	Відсоток вантажного транспорту, %		
	10	20	30
Вантажний ( $N_{\text{вант}}$ )	1 026	2 053	3 079
Легковий ( $N_{\text{легк}}$ )	8 301	7 274	6 248

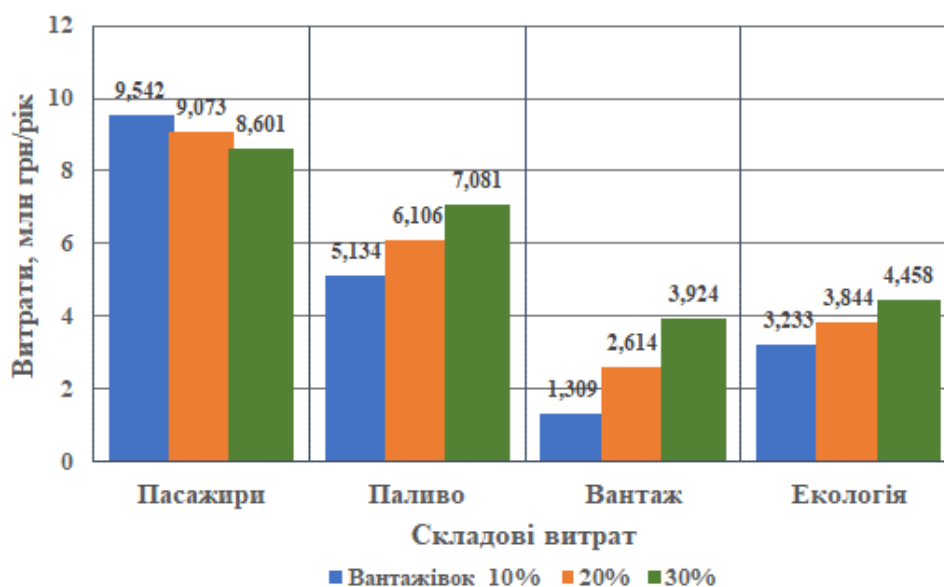


Рис. 2. Економічні втрати автотранспорту від непродуктивних простоїв на переїзді (Наумівка – Севастополь)

Fig. 2. Economic losses of motor transport due to unproductive downtime at the crossing (Naumivka – Sevastopol)

Для розглянутих прикладів загальні втрати від простою транспорту склали від 19,2 до 24,1 млн грн/рік залежно від кількості вантажних транспортних засобів. Найбільші втрати пов'язані з простоем пасажирів (49,7...35,7 %) та витратами палива (26,7...29,4 %). Витрати від простою вантажу склали 6,8...16,3 %, від забруднення навколишнього середовища 16,8...18,5 % від загальних втрат.

## Наукова новизна та практична значимість

Отримані результати базуються на застосуванні запропонованої методики оцінки економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах. Алгоритм визначення економічних втрат автотранспорту передбачає урахування низки факторів, пов'яза-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

них із транспортним потоком, тривалістю простоїв, витратами пального, втраченим пасажиром часом, а також забрудненням довкілля. Запропонована в роботі надає можливість оцінювати економічні втрати автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах, що підтверджено прикладами з експлуатації переїздів на напрямках регіональної філії «Придніпровська залізниця».

На основі отриманих результатів можна мінімізувати втрати автотранспорту від непродуктивних простоїв завдяки впровадженню інноваційних рішень, гнучкому регулюванню руху транспортним потоком, комплексному плануванню й модернізації інфраструктури.

### Висновки

Запропонована в роботі послідовність розрахунків дозволяє обґрунтовано оцінити втрати та прийняти раціональне рішення про доцільність модернізації переїзду.

На сьогодні в Україні не встановлено єдиної національної ставки податку або плати за викиди NO<sub>x</sub> та PM<sub>2.5</sub>, тому в наведених прикладах їх не враховано.

Економічні втрати від простоїв транспорту на залізничних переїздах (у прикладах від 3,3 до 24,1 млн грн/рік) можуть виступати вагомим аргументом для обґрунтування заміни таких переїздів шляхопроводами. Рішення про має бути прийнято на основі комплексного аналізу всіх факторів: економічних, соціальних, екологічних та технічних.

Отримані результати демонструють значний потенціал для мінімізації втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв. Упровадження запропонованих інноваційних рішень, гнучке регулювання транспортних потоків, комплексне планування та модернізація інфраструктури є ключовими факторами для досягнення цієї мети.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Берзіна С. В., Берзін В. М., Вакараш В. М., Ворфоломєєв А. В., Горопацький В. Г., Дюжилова Н. О., ... Ярьєвська І. І. *Системи екологічного управління: сучасні тенденції та міжнародні стандарти*. Київ : Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 134 с.
2. Курган М. Б., Лужицький О. Ф., Іванов Р. В., Хмелевська Н. П., Хмелевський В. С. Упровадження інноваційних технологій під час модернізації наявних переїздів для організації швидкісного руху поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 1 (105). С. 62–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/303191>
3. Трошин М. Ю., Шляхов К. В., Пишний М. С. Дослідження безпеки руху на залізничних переїздах. *VI International Scientific and Practical Conference «RICERCHE SCIENTIFICHE E METODI DELLA LORO REALIZZAZIONE: ESPERIENZA MONDIALE E REALTÀ DOMESTICHE»* (Bologna, 15 Nov. 2024). Bologna, 2024. SEZIONE 18. P. 194–199. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-15.11.2024.044>
4. ЦП-0174 *Інструкція з експлуатації залізничних переїздів*. Київ : Верховна Рада України, 2007. 167 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0162-07#Text>
5. Anagnostopoulos A. Assessing Safety and Infrastructure Design at Railway Level Crossings Through Microsimulation Analysis. *Future Transportation*. 2025. Vol. 5. Iss. 1. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010024>
6. Chong K. Spatiotemporal Influence Analysis Through Traffic Speed Pattern Analysis Using Spatial Classification. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15010196>
7. de Rus G., Pilar Socorro M., Valido J., Campos J. Cost-benefit analysis of transport projects: Theoretical framework and practical rules. *Transport Policy*. 2022. Vol. 123. P. 25–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.04.008>
8. Kawamura K., Fazio J., Choobchian P. Reducing delays caused by at-grade rail crossings in disadvantaged communities through non-physical measures. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 79. P. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.03.008>
9. Nowak M., Andrzejewski M., Tomaszewski S., Daszkiewicz P., Urbański P. Evaluation of Passenger Car Emission Indexes in Relation to Passing through the Rail-road Crossing. *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*. 2021. P. 579–583. DOI: <https://doi.org/10.5220/0010465305790583>

10. Pasha J., Dulebenets M. A., Singh P., Moses R., Sobanjo J., Ozguven E. E. Towards improving sustainability of rail transport by reducing traffic delays at level crossings: A case study for the State of Florida. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2021. Vol. 1. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2021.100001>
11. Singhal V., Jain S. S., Anand D., Singh A., Verma S., Rodrigues J. J. P. C., J. ... Iwendi C. Artificial Intelligence Enabled Road Vehicle-Train Collision Risk Assessment Framework for Unmanned Railway Level Crossings. *IEEE Access*. Vol. 8. P. 113790–113806. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002416>
12. Skabardonis A. *Highway Capacity Manual Methodologies for Corridors Involving Freeways and Surface Streets*. Washington, DC : The National Academies Press. 390 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/25963>
13. Tshaii D.C., Mishra A.K., Pidanic J. Demonstration of Smart Railway Level Crossing Design and Validation Using Data from Metro Rail, South Africa. *Journal of Advanced Transportation*. 2022. Vol. 2022. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/6614242>
14. Ul Islam Z., Hossain Lipu M. S., Karim T. F., Fuad A. M., Ali M. M. N., Shihavuddin A., Al Mansur A. Optimizing hybrid renewable energy based automated railway level crossing in Bangladesh: Techno-economic, emission and sensitivity analysis. *Energy Conversion and Management: X*. Vol. 24. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100744>

M. B. KURHAN<sup>1\*</sup>, O. F. LUZHITSKYI<sup>2</sup>, R. V. IVANOV<sup>3</sup>, A. M. KURHAN<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail [kunibor@gmail.com](mailto:kunibor@gmail.com), ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail [oleg.luzhickii@gmail.com](mailto:oleg.luzhickii@gmail.com), ORCID 0000-0001-6519-7447

<sup>3</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail [ivanovrodion@ukr.net](mailto:ivanovrodion@ukr.net), ORCID 0009-0005-9125-9468

<sup>4</sup>SE «Scientific and Design Technological Bureau of Track Facilities Ukrzaliznytsia», Lyubarskogo St, 181, Dnipro, Ukraine, 49034, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail [kudl82@ukr.net](mailto:kudl82@ukr.net), ORCID 0009-0005-2527-7502

## Assessment of Economic Losses of Road Transport Due to Unproductive Downtime at Railway Crossings

**Purpose.** Determining economic losses from unproductive downtime at railroad crossings requires a comprehensive approach. The authors aim to develop a methodology for calculating the economic losses of motor vehicles from unproductive downtime at railroad crossings with heavy traffic and to propose rational solutions regarding the feasibility of modernizing crossings. **Methodology.** The calculations of economic losses incurred by motor vehicles due to unproductive downtime at railroad crossings take into account the category of the crossing, the number of trains and the number of vehicles of different categories crossing the crossing during the day, as well as other factors included in the automated system «Pereizd» («Crossing»). The methodology takes into account the economic cost of time lost by passengers waiting in cars and buses in front of a closed crossing, as well as the economic cost of cargo downtime depending on the type of trucks and the type of transportation. **Findings.** During the study, the authors determined at which crossings and at what intensity of traffic the greatest economic losses from unproductive downtime are observed. The results obtained take into account the daily traffic intensity at the crossing: the number of trains and the number of vehicles of various categories, the category of crossings, and other factors. It was found out how the intensity of motor vehicle and rail transport, the frequency of opening barriers, and the duration of downtime for cars, buses, and trucks affect the costs and fuel consumption when engines are idling. The negative impact of unproductive downtime on the environment was assessed. **Originality.** The paper proposes a methodology for assessing the economic losses of motor vehicles from unproductive downtime at the busiest railroad crossings. The economic losses of motor vehicles are assessed by analyzing a number of factors related to traffic flow, downtime, fuel consumption, lost time, and environmental pollution. **Practical value.** The developed method makes it possible to estimate the economic losses of motor vehicles from unproductive downtime at railroad crossings, which is confirmed by examples from the operation of crossings on the routes of the regional branch «Prydniprovskaya Railway».

**Keywords:** crossing; traffic flow; vehicle downtime; economic losses; traffic intensity; impact of transport on the environment; automated information system «Pereizd»

## REFERENCES

- Berzina, S. V., Berzin, V. M., Vakarash, V. M., Vorfolomeyev, A. V., Goropaczkyj, V. G., Dyuzhylova, N. O., ... & Yareskovska, I. I. (2017). *Systemy ekologichnogo upravlinnya: suchasni tendenciyi ta mizhnarodni standarty*. Kyiv: Instytut ekologichnogo upravlinnya ta zbalansovanogo pryrodokorystuvannya. (in Ukrainian)
- Kurhan, M. B., Luzhytskyi, O. F., Ivanov, R. V., & Khmelevskyi, V. S. (2024). Implementation of Innovative Technologies During the Modernization of Existing Level Crossings for High-Speed Train Traffic. *Science and Transport Progress*, 1(105), 62-83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/303191> (in Ukrainian)
- Troshyn, M. Yu., Shlyakhov, K. V., & Pyshnyy, M. S. (2024, Nov.). Doslidzhennya bezpeky rukhu na zaliznychnykh pereyizdakh. In *VI International Scientific and Practical Conference «RICERCHE SCIENTIFICHE E METODI DELLA LORO REALIZZAZIONE: ESPERIENZA MONDIALE E REALTÀ DOMESTICHE» (SEZIONE 18, pp. 194-199)*. Bologna, Italy. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-15.11.2024.044> (in Ukrainian)
- CzP-0174 Instrukciya z ulashtuvannya ta ekspluataciyi zalizny`chny`x pereyizdiv. Kyiv: Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0162-07#Text> (in Ukrainian)
- Anagnostopoulos, A. (2025). Assessing Safety and Infrastructure Design at Railway Level Crossings Through Microsimulation Analysis. *Future Transportation*, 5(1), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010024> (in English)
- Chong, K. (2025). Spatiotemporal Influence Analysis Through Traffic Speed Pattern Analysis Using Spatial Classification. *Applied Sciences*, 15, 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15010196> (in English)
- de Rus, G., Socorro, M. P., Valido, J., & Campos, J. (2022). Cost-benefit analysis of transport projects: Theoretical framework and practical rules. *Transport Policy*, 123, 25-39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.04.008> (in English)
- Kawamura, K., Fazio, J., & Choobchian, P. (2024). Reducing delays caused by at-grade rail crossings in disadvantaged communities through non-physical measures. *Transportation Research Procedia*, 79, 44-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.03.008> (in English)
- Nowak, M., Andrzejewski, M., Tomaszewski, S., Daszkiewicz, P., & Urbański, P. (2021). Evaluation of Passenger Car Emission Indexes in Relation to Passing through the Rail-road Crossing. *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 579-583. DOI: <https://doi.org/10.5220/0010465305790583> (in English)
- Pasha, J., Dulebenets, M. A., Singh, P., Moses, R., Sobanjo, J., & Ozguven, E. E. (2021). Towards improving sustainability of rail transport by reducing traffic delays at level crossings: A case study for the State of Florida. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 1, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2021.100001> (in English)
- Singhal, V., Jain, S. S., Anand, D., Singh, A., Verma, S., Rodrigues, J. J. P. C., ... & Iwendi, C. (2020). Artificial Intelligence Enabled Road Vehicle-Train Collision Risk Assessment Framework for Unmanned Railway Level Crossings. *IEEE Access*, 8, 113790-113806. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3002416> (in English)
- Skabardonis, A. (2020). *Highway Capacity Manual Methodologies for Corridors Involving Freeways and Surface Streets*. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: <https://doi.org/10.17226/25963> (in English)
- Tshaai, D. C., Mishra, A. K., & Pidanic, Jan. (2022). Demonstration of Smart Railway Level Crossing Design and Validation Using Data from Metro Rail, South Africa. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/6614242> (in English)
- Ul Islam, Z., Hossain Lipu, M. S., Karim, T. F., Fuad, A. M., Ali, M. M. N., Shihavuddin, A., & Al Mansur, A. (2024). Optimizing hybrid renewable energy based automated railway level crossing in Bangladesh: Techno-economic, emission and sensitivity analysis. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 1-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100744> (in English)

Надійшла до редколегії: 04.02.2025

Прийнята до друку: 11.06.2025

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 656.2.073.235:629.463.65-048.24

С. В. ПАНЧЕНКО<sup>1</sup>, А. О. ЛОВСЬКА<sup>2\*</sup>, М. В. ПАВЛЮЧЕНКОВ<sup>3, 4</sup>,  
П. В. РУКАВІШНИКОВ<sup>5</sup>, Д. Г. ПЕТРЕНКО<sup>6</sup>, М. Г. РАВЛЮК<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Автоматика та комп'ютерне телекерування рухом поїздів», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 00, ел. пошта panchenko074@ukr.net, ORCID 0000-0002-7626-9933

<sup>2\*</sup>Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

<sup>3</sup>Каф. «Теоретична і будівельна механіка», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 31 25, ел. пошта pavliuchenkov@ukr.net, ORCID 0000-0003-0542-7284

<sup>4</sup>Каф. будівельних конструкцій, Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, Суми, Україна, 40000, тел. +38 (0542) 70 11 86, ел. пошта pavliuchenkov@ukr.net, ORCID 0000-0003-0542-7284

<sup>5</sup>Каф. «Теплотехніка, теплові двигуни та енергетичний менеджмент», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 21, ел. пошта Rukavishnikov@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-9670-3071

<sup>6</sup>Каф. будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 31 07, ел. пошта petrenko\_dmytro@ukr.net, ORCID 0000-0002-8168-7224

<sup>7</sup>Каф. «Механіка та проектування машин», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 51, ел. пошта ravmg@ukr.net, ORCID 0000-0002-6021-660X

### Експериментальне дослідження міцності кришки люка піввагона під час перевезення в ньому контейнерів

**Мета.** Робота спрямована на висвітлення особливостей експериментальних досліджень міцності кришки люка піввагона, навантаженої від фітінгового упора для кріплення контейнерів. **Методика.** Для можливості використання піввагонів під контейнерні перевезення проведено експериментальне дослідження міцності кришки люка піввагона у випадку її навантаження від фітінгового упора. При цьому проведено стендові випробування в дослідній лабораторії Центру діагностики споруд транспортногo призначення при Українському державному університеті залізничного транспорту. Визначення напружень, які виникають у конструкції кришки люка, здійснено з використанням методу електричного тензометрування. Монтаж тензорезисторів здійснено за мостовою схемою. Місця розміщення тензорезисторів на кришці люка визначено за отриманими теоретичним шляхом полями напружень, що виникають у кришці люка. Перед монтажем тензорезисторів здійснено їх тарування. Навантаження на фітінговий упор передавали через металевий стакан, який імітував фітінг контейнера. Максимальну величину навантаження, яке передавали на фітінговий упор, узятю рівною 6 т (60 кН), що відповідає максимальному завантаженню стану контейнера типорозміру ІСС. Показання тензорезисторів знімали за допомогою тензометричної станції ВВП–8. **Результати.** Під час проведення досліджень максимальні напруження в кришці люка склали 345,4 МПа. Отримані напруження перевищують допустимі, що дозволяє зробити висновок про неможливість використання такої схеми закріплення контейнерів на практиці. Найбільша розбіжність між результатами комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження міцності кришки люка піввагона складає близько 10 % і зафіксована для навантаження на фітінговий упор у 30 кН. **Наукова новизна.** Запропоновано процедуру проведення експериментального дослідження міцності кришки люка піввагона в разі навантаження від фітінгового упора для кріплення контейнерів. Отримано залежності напружень у кришці люка від навантаження, яке вона сприймає

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

через фітинговий упор. **Практична значимість.** Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо адаптації піввагонів до перевезень контейнерів та підвищенню ефективності їх експлуатації.

*Ключові слова:* залізничний транспорт; кришка люка піввагона; випробування кришки люка на міцність; навантаженість кришки люка; контейнерні перевезення

### Вступ

Інтенсифікація розвитку контейнерних перевезень викликає необхідність забезпечення залізничної галузі транспортними засобами з поліпшеними характеристиками [7, 8, 12]. Наразі перевезення контейнерів залізницею здійснюються у вагонах-платформах, оснащених фітинговими упорами для кріплення контейнерів. Разом із цим затребуваність контейнерних перевезень, особливо в міжнародному сполученні, викликає нестачу вагонів-платформ. Переснащення універсальних вагонів-платформ шляхом постановки на них фітингових упорів не вирішило повністю питання забезпеченості залізничної галузі транспортними засобами для перевезень контейнерів [11]. У зв'язку з цим доцільним є визначення можливості використання під контейнерні перевезення піввагонів, що у свою чергу, вимагає дослідження міцності їх несучої конструкції.

Аналіз літературних джерел за тематикою дослідження підтверджує, що питання визначення міцності та вдосконалення кришок люків піввагонів є досить актуальними. Наприклад, у роботі [4] висвітлено результати досліджень міцності кришки люка піввагона у випадку навантаження її від фітингового упора для кріплення контейнерів. Визначено напружений стан кришки люка та встановлено, що перевезення контейнерів у піввагонах, підлога яких утворена кришками розвантажувальних люків, з урахуванням досліджуваної схеми їх взаємодії, неможливе. Подібні дослідження проведено і в роботі [9]. На відміну від роботи [4], під час проведення розрахунків автори врахували не тільки вертикальні навантаження, а й поздовжні. Недоліками робіт [4, 9] є те, що автори не проводили експериментальні дослідження міцності кришки люка, що дозволило б підтвердити достовірність отриманих теоретичним шляхом результатів.

Автори публікації [2] провели комплексний розрахунок на міцність кришки люка піввагона вдосконаленої конструкції для нормативних та наднормових режимів навантажень. Установ-

лено, що міцність запропонованої конструкції кришки люка забезпечується. У всіх розглянутих розрахункових режимах напруження, які виникають у її складових, перебувають у межах допустимих. Однак потрібно зазначити, що під час проведення розрахунків на міцність кришки люка автори не досліджували схему її навантаження від контейнера.

У роботі [5] запропоновано формалізоване описання конструкції кришки люка піввагона. Проведені дослідження дозволили структурувати інформацію щодо конструкційних та експлуатаційних властивостей роботи кришки люка. Разом з цим автори не взяли до уваги схему навантаження кришки люка від контейнера.

Для поліпшення міцності кришки люка на піввагона в роботі [1] запропоновано вдосконалення її конструкції шляхом посилення додатковими поясами. Наведено результати розрахунку на міцність кришки люка піввагона. Однак автори обмежилися тільки основними режимами її навантажень. Тобто до уваги не взято схему навантаження кришки люка від контейнера.

Подібний недолік має і робота [10], де також запропоновано вдосконалену конструкцію кришки люка зі складовими типу сендвіч. Міцність кришки люка визначено у квазистатичі. Результати розрахунку на міцність довели доцільність конструкції кришки люка.

Нову конструкцію кришки люка, особливістю якої є те, що вона має випуклу конфігурацію, запропоновано у роботі [6]. Наведено результати розрахунку кришки люка такої конструкції на міцність. Але зазначена конфігурація кришки люка унеможливує використання піввагона для контейнерних перевезень.

### Мета

Автори ставлять за мету висвітлення особливостей експериментальних досліджень міцності кришки люка піввагона, навантаженої від фітингового упора для кріплення контейнерів. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- провести експериментальне дослідження міцності кришки люка піввагона, навантаженої від фітингового упора;
- провести порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень міцності кришки люка з комп'ютерним моделюванням.

**Методика**

Для експериментального дослідження міцності кришки люка піввагона під час перевезення в ньому контейнерів проведено стендові випробування в дослідній лабораторії Центру діагностики споруд транспортногo призначення при Українському державному університеті залізничного транспорту (м. Харків).

Визначення напружень, які виникають у конструкції кришки люка, здійснено з використанням методу електричного тензометрування. Монтаж тензорезисторів здійснено за мостовою схемою. Місця розміщення тензорезисторів на кришці люка визначено за отриманими теоретичним шляхом полями напружень, що виникають у кришці люка, і наведено на рис. 1.

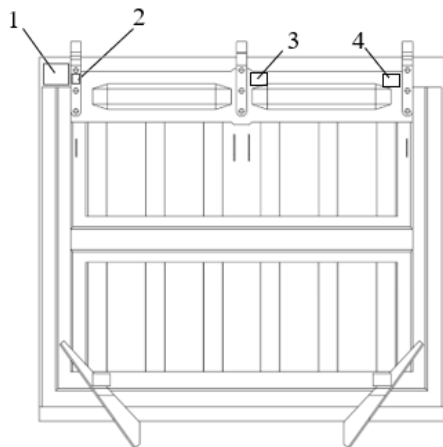


Рис. 1. Розміщення груп тензорезисторів на кришці люка (вигляд знизу):  
1 – перша група; 2 – друга група;  
3 – третя група;  
4 – четверта група

Fig. 1. Placement of strain gauge groups on the hatch cover (bottom view):  
1 – first group; 2 – second group;  
3 – third group;  
4 – fourth group

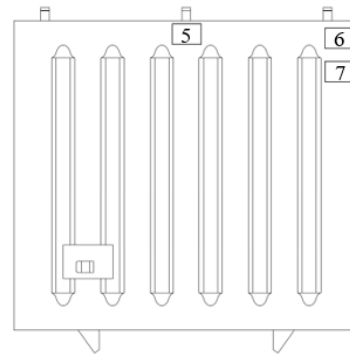


Рис. 2. Розміщення груп тензорезисторів на кришці люка (вигляд зверху):  
5 – п'ята група; 6 – шоста група; 7 – сьома група

Fig. 2. Location of strain gauge groups on the hatch cover (top view):  
5 – fifth group; 6 – sixth group; 7 – seventh group

Перед монтажем тензорезисторів здійснено їх тарування. При цьому застосовано тензорезистори з базою 10 мм та опором 100 Ом.

Монтаж тензорезисторів проведено за допомогою клею на ціакриновій основі (рис. 3, 4). Перед цим місця монтажу зачищено та знежирено.

*a – a*



*б – б*



Рис. 3. Розміщення тензорезисторів на кришці люка (нижня частина полотна):  
*a* – у зоні розміщення петлі; *б* – за обв'язкою

Fig. 3. Placement of strain gauges on the hatch cover (lower part of the canvas):  
*a* – in the hinge area; *b* – behind the strapping

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

*a – a**б – б*

Рис. 4. Розміщення тензорезисторів на кришці люка (верхня частина полотна):  
*a* – з лівого боку; *б* – з правого боку

Fig. 4. Location of strain gauges on the hatch cover (upper part of the canvas):  
*a* – on the left side; *b* – on the right side

Для випробування кришки люка створено спеціальний стенд (рис. 5), на якому кришку закріплено за петлі (рис. 6), за допомогою металевих пальців.

З протилежного боку закріплення кришки люка здійснено в зонах її взаємодії із запірними механізмами. Для цього під кронштейни встановлено опори.

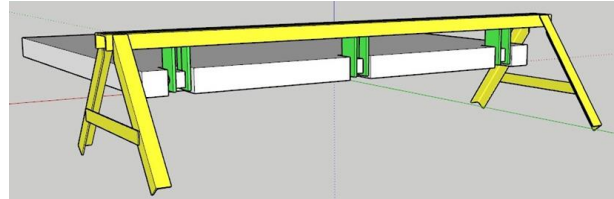


Рис. 5. Зони закріплення кришки люка за петлі  
Fig. 5. Areas for fixing the hatch cover to the hinges

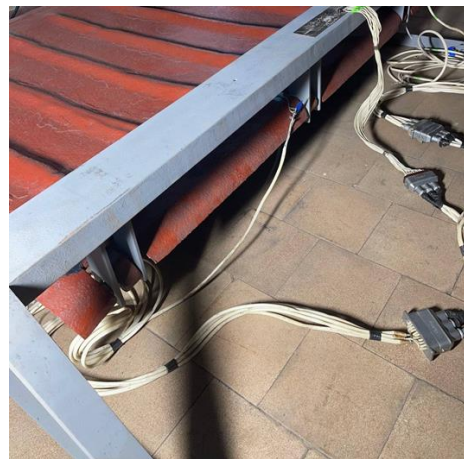


Рис. 6. Кріплення кришки люка до стенда  
Fig. 6. Fastening the hatch cover to the stand

Фітинговий упор встановлено на полотні кришки люка. Місце його розташування визначено з урахуванням розміщення в піввагоні двох контейнерів типорозміру 1СС. Навантаження на фітинговий упор передавали через металевий стакан, який імітував фітинг контейнера (рис. 7).



Рис. 7. Передача навантаження на фітинговий упор  
Fig. 7. Transferring the load to the fitting stop

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Зверху на стакан була укладена металева пластина, на яку встановлено домкрат. Верхня частина домкрата опиралася в горизонтальну балку. Через цей домкрат передавали вертикальне навантаження на стакан. Величину навантаження контролювали динамометром. При цьому максимальну величину навантаження взяли рівною 6 т (60 кН), що відповідає максимально завантаженому стану контейнера типорозміру 1СС. Навантаження фітингового упора відбувалося в діапазоні 0 – 60 кН з кроком 5 кН.

Показання тензорезисторів знімали за допомогою тензометричної станції ВНП–8.

## Результати

Найбільші показання деформацій під час випробувань зафіксовано групами тензорезисторів 6 і 7 (рис. 8 і 9).

Із рис. 8 і 9 видно, що залежність відносних деформацій від навантаження на фітинговий упор є лінійною. Напруження, які виникають у кришці люка, наведено в табл. 1 і 2, а також на рис. 10 та 11.

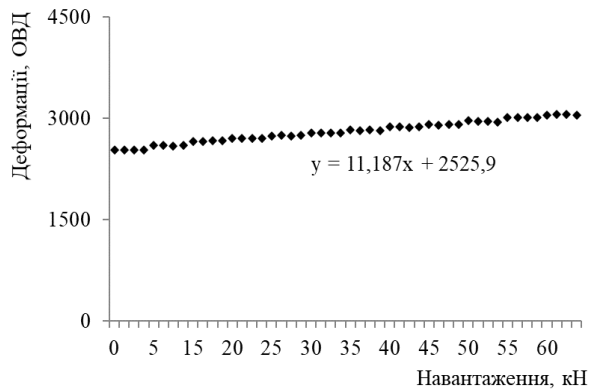


Рис. 8. Залежність відносних деформацій у кришці люка від вертикального навантаження на фітинговий упор (група тензорезисторів № 6)

Fig. 8. Dependence of relative deformations in the hatch cover on the vertical load on the fitting stop (strain gauge group No. 6)

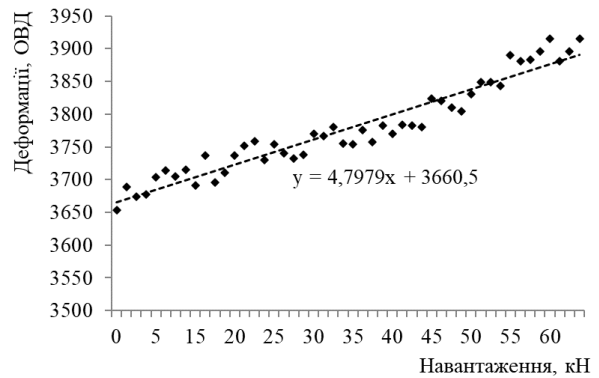


Рис. 9. Залежність відносних деформацій у кришці люка від вертикального навантаження на фітинговий упор (група тензорезисторів № 7)

Fig. 9. Dependence of relative deformations in the hatch cover on the vertical load on the fitting stop (strain gauge group No. 7)

Таблиця 1

Напруження, які виникають у кришці люка в зоні розміщення групи тензорезисторів № 6

Table 1

Stresses arising in the manhole cover in the area of strain gauge group No. 6	
Навантаження, кН	Напруження, МПа
5	23,1
10	51,3
15	83,54
20	116,5
25	145,3
30	174,7
35	203,6
40	232,5
45	262,1
50	291,8
55	318,4
60	345,4

Таблиця 2

**Напруження, які виникають у кришці люка в зоні розміщення групи тензорезисторів № 7**

Table 2

**Stresses arising in the hatch cover in the area of strain gauge group No. 7**

Навантаження, кН	Напруження, МПа
5	17,4
10	43,6
15	71,1
20	105,3
25	128,7
30	163,8
35	195,4
40	221,6
45	252,3
50	276,5
55	305,6
60	342,8

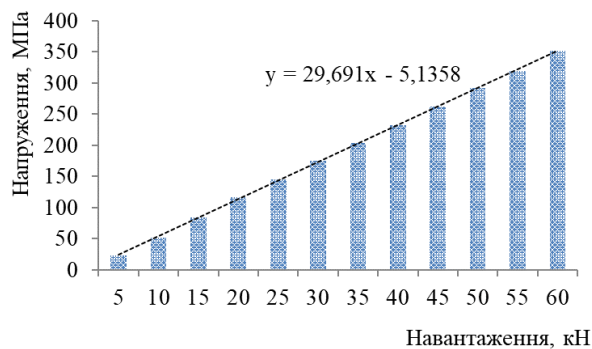


Рис. 10. Напруження, які зафіксовано групою тензорезисторів № 6

Fig. 10. Stresses recorded by the group of strain gauges No. 6

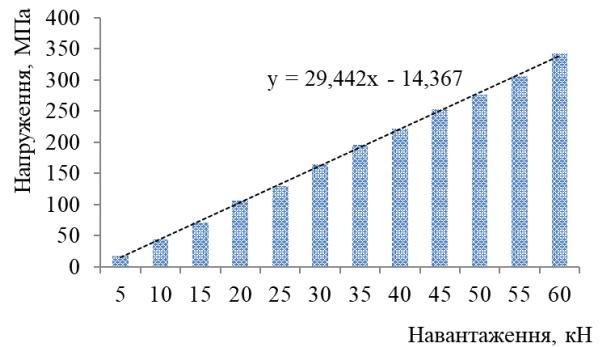


Рис. 11. Напруження, які зафіксовано групою тензорезисторів № 7

Fig. 11. Stresses recorded by the group of strain gauges No. 7

Отже, максимальні напруження в кришці люка склали 345,4 МПа. Ці напруження перевищують допустимі, які встановлено для марки сталі металокопункції кришки люка [3]. Розбіжність між результатами комп'ютерного моделювання міцності кришки люка та експериментальними дослідженнями наведено на рис. 12.

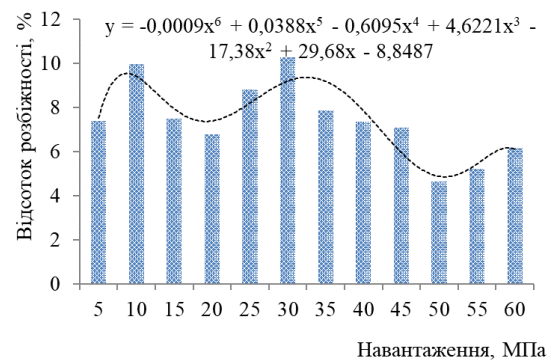


Рис. 12. Розбіжність між результатами комп'ютерного моделювання міцності кришки люка та експериментальними дослідженнями

Fig. 12. Discrepancy between the results of computer modeling of hatch cover strength and experimental studies

Особливості теоретичного визначення міцності кришки люка наведено в публікації [4]. Із рис. 12 видно, максимальна розбіжність між результатами комп'ютерного моделювання на експерименту складає близько 10 %. Вона зафіксована для навантаження на фітинговий упор у 30 кН.

### Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано процедуру проведення експериментального дослідження міцності кришки люка піввагона в разі навантаження від фітінгового упора для кріплення контейнерів. Отримано залежності напружень у кришці люка від навантаження, яке вона сприймає через фітінговий упор.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо адаптації піввагонів до перевезень контейнерів та підвищенню ефективності їх експлуатації.

### Висновки

1. Проведено експериментальне дослідження міцності кришки люка піввагона, навантаженої від фітінгового упора. При цьому здійснено стендові випробування із використанням методу електричної тензометрії. Навантаження, передане на кришку люка, варіювалося в діапазоні 0 – 60 кН із кроком 5 кН. На підставі про-

ведених випробувань встановлено, що максимальні напруження виникають у зоні розміщення петлі кришки люка і складають 345,4 МПа. Ці напруження перевищують допустимі значення для сталі металокопункції кришки люка. Це дозволяє зробити висновок, що перевезення контейнерів із використанням досліджуваної схеми їх закріплення у піввагоні неможливе.

2. Проведено порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень міцності кришки люка з комп'ютерним моделюванням. Встановлено, що найбільша розбіжність складає близько 10 % і зафіксована для навантаження на фітінговий упор у 30 кН.

### Подяка

Ця публікація підготовлена в рамках виконання стипендіальної роботи Верховної Ради України для молодих учених – докторів наук «Ефективні конструктивні рішення залізничного рухомого складу для перевезень стратегічних вантажів» (№ ДР 0124U003906).

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Візняк Р. І., Чепурченко І. В., Яценко А. О. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 159. С. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018>
- Горбунов М. І., Фомін О. В., Ловська А. О., Коваленко В. В. Комплексний розрахунок поліматеріального виконання кришки люка напіввагону з проміжним Ш-подібним обв'язуванням. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. Вип. 3 (75). С. 138–148. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/132863>
- ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.
- Ловська А. О., Мурад'ян А. О., Рукавішников П. В., Демидюков О. В. Аналіз міцності кришки люка універсального напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74). № 2. С. 304–309. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/42>
- Фомін О. В., Горбунов М. І., Коваленко В. В., Міщук І. Р. Формалізовані описання конструкцій кришок напіввагонів (Частина 1). *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 2 (243). С. 216–224.
- Baranovskyi D., Bulakh M., Myamlin S., Kibal I. New Design of the Hatch Cover to Increase the Carrying Capacity of the Gondola Car. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. Vol. 16. Iss. 6. P. 186–191. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/156205>
- Dižo J., Blatnický M. Investigation of ride properties of a three-wheeled electric vehicle in terms of driving safety. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 40. P. 663–670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.094>
- Dižo J., Blatnický M., Harušinec J., Suchánek A. Assessment of Dynamics of a Rail Vehicle in Terms of Running Properties While Moving on a Real Track Model. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. Iss. 3. P. 536–552. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030536>

9. Gerlici J., Lovska A., Vatulia G., Dizo J., Blatnický M. Research into the Strength of the Discharge Door of an Open Wagon Transporting Containers. *15th International scientific conference on aeronautics, automotive, and railway engineering and technologies (BulTrans-2023)* (Sozopol, 10–13 Sept. 2023). Sozopol, 2024. Vol. 3129. Iss. 1. P. 060001. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0201451>
10. Lovska A., Nerubatskyi V., Plakhtii O., Myamlin S. Determining the influence of sandwich-type components on the load of a hatch cover in a universal open wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 1/7 (127). P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.296620>
11. Reidemeister A. H., Kalashnyk V. A., Shykunov A. A. Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Science Transport Progress*. 2016. № 2 (62). P. 148–156. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/67334>
12. Vatulia G. L., Lovska A. O., Krasnokutskyi Ye. S. Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012140. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012140>

S. V. PANCHENKO<sup>1</sup>, A. O. LOVSKA<sup>2\*</sup>, M. V. PAVLIUCHENKOV<sup>3, 4</sup>,  
P. V. RUKAVISHNYKOV<sup>5</sup>, D. H. PETRENKO<sup>6</sup>, M. H. RAVLYUK<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Automation and Computer Telecontrol of Trains», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 00, e-mail panchenko074@ukr.net, ORCID 0000-0002-7626-9933

<sup>2\*</sup>Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

<sup>3</sup>Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova str. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 31 25, e-mail pavliuchenkov@ukr.net, ORCID 0000-0003-0542-7284

<sup>4</sup>Dep. Building constructions, Sumy National Agrarian University, Gerasim Kondratiev str., 160, Sumy, Ukraine, 40000, tel. +38 (0542) 70 11 86, e-mail pavliuchenkov@ukr.net, ORCID 0000-0003-0542-7284

<sup>5</sup>Dep. «Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 21, e-mail Rukavishnikov@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-9670-3071

<sup>6</sup>Dep. Building constructions, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova str. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 31 07, e-mail petrenko\_dmytro@ukr.net, ORCID 0000-0002-8168-7224

<sup>7</sup>Dep. «Mechanics and Machine Design», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 51, e-mail ravmg@ukr.net, ORCID 0000-0002-6021-660X

## Experimental Research of the Strength of an Open Wagon Hatch Cover During the Transportation of Containers in it

**Purpose.** The work is aimed at highlighting the peculiarities of experimental studies of the strength of a hatch cover of an open wagon loaded from a fitting stop for fastening containers. **Methodology.** In order to make it possible to use open wagons for container transportation, an experimental study of the hatch cover of an open wagon loaded from a fitting stop was conducted. Bench tests were conducted in the research laboratory of the “Center for Diagnostics of Transport Structures” at the Ukrainian State University of Railway Transport. The stresses that arise in the design of the hatch cover were determined using the method of electrical strain gage measurement. The installation of strain gauges was carried out according to the bridge scheme. The locations of the strain gauges on the hatch cover were determined based on the theoretically obtained stress fields that arise in the hatch cover. Before installing the strain gauges, they were calibrated. The load on the fitting stop was transmitted through a metal cup that imitated the container fitting. The maximum load transferred to the fitting stop is assumed to be 6 t (60 kN), which corresponds to the maximum loaded state of a container of standard size 1CC. The strain gauge readings were taken using a VNP-8 strain gauge station. **Findings.** During the research, the maximum stresses in the hatch cover were 345.4 MPa. The obtained stresses exceed the permissible ones, which allows us to conclude that it is impossible to use such a container fastening scheme in practice. The largest percentage of discrepancy between the results of computer modeling and experimental research on the strength of the hatch cover of an open wagon is about 10% and is recorded when the load on the fitting stop is 30 kN. **Originality.** A procedure for conducting an experimental study of the strength of the hatch cover of an open wagon under the load from the fitting stop for fastening containers is proposed. The dependence of the stresses in the hatch cover of the open wagon on the load it perceives through the fitting stop was obtained. **Practical value.** The conducted research will contribute to the creation

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

of recommendations for adapting open wagons to container transportation and increasing the efficiency of container transportation.

**Keywords:** railway transport; open wagon hatch cover; hatch cover strength test; hatch cover load; container transportation

## REFERENCES

1. Viznyak, R., Chepurchenko, I., & Yatsenko, A. (2016). Features of identifying operational loads the body of open-top car and ways of improving its design to ensure durability and preservation. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 159, 91-97. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018> (in Ukrainian)
2. Horbunov, M. I., Fomin, O. V., Lovska, A. O., & Kovalenko, V. V. (2018). Complex calculation of hatch cover of gondola car from polytypic materials with intermediate s-shape strapping. *Science and Transport Progress*, 3(75), 138-148. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/132863> (in Ukrainian)
3. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi (nasamohidnih)*, 250 DSTU 7598:2014 (2015). (in Ukrainian)
4. Lovska, A. O., Muradian, A. O., Rukavishnikov, P. V., & Demydiakov, O. V. (2024). Analysis of the strength of the hatch cover of a universal open wagon when transporting containers in it. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 2, 304-309. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/42> (in Ukrainian)
5. Fomin, O. V., Horbunov, M. I., Kovalenko, V. V., Mishchuk, I. R. (2018). Formalized description of the basic execution of constructions of the basket christmas structures. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volody-myra Dalia*, 2(243), 216-224. (in Ukrainian)
6. Baranovskyi, D., Bulakh, M., Myamlin, S., & Kebal, I. (2022). New Design of the Hatch Cover to Increase the Carrying Capacity of the Gondola Car. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(6), 186-191. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/156205> (in English)
7. Gerlici, J., Lovska, A., Vatulia, G., Dizo, J., & Blatnický, M. (2024, Sept.). Research into the strength of the discharge door of an open wagon transporting containers. In *15th International scientific conference on aeronautics, automotive, and railway engineering and technologies (BulTrans-2023)* (Vol. 3129, Iss. 1, pp. 060001). Sozopol, Bulgaria. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0201451> (in English)
8. Dižo, J., & Blatnický, M. (2019). Investigation of ride properties of a three-wheeled electric vehicle in terms of driving safety. *Transportation Research Procedia*, 40, 663-670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.094> (in English)
9. Dižo, J., Blatnický, M., Harušinec, J., & Suchánek, A. (2022). Assessment of Dynamics of a Rail Vehicle in Terms of Running Properties While Moving on a Real Track Model. *Symmetry*, 14(3), 536-552. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030536> (in English)
10. Lovska, A., Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., & Myamlin, S. (2024). Determining the influence of sandwich-type components on the load of a hatch cover in a universal open wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7(127), 6-13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.296620> (in English)
11. Reidemeister, O. H., Kalashnyk, V. O., & Shykunov, O. A. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Science and Transport Progress*, 2(62), 148-156. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/67334> (in English)
12. Vatulia, G. L., Lovska, A. O., & Krasnokutskyi, Y. S. (2023). Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254(1), 012140. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012140> (in English)

Надійшла до редколегії: 30.01.2025

Прийнята до друку: 09.06.2025

# ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

UDK 624.072.3:725.1

A. V. RADKEYCH<sup>1</sup>, D. O. BANNIKOV<sup>2\*</sup>, J. C. MA<sup>3</sup>, S. W. LIU<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 307 81 44, e-mail a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517

<sup>2\*</sup>Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

<sup>3</sup>Dep. «Intelligent Construction Engineering», Zhejiang Guangsha Vocational and Technical University of Construction, Guangfu East St., 1, Dongyang, Zhejiang, China, 322100, tel. +86 13 19730364030, e-mail jianchun@zjgsdx.edu.cn, ORCID 0009-0000-8052-5314

<sup>4</sup>Dep. «Architectural Design», Zhejiang Guangsha Vocational and Technical University of Construction, Guangfu East St., 1, Dongyang, Zhejiang, China, 322100, tel. +86 13918089266, e-mail ahlz1944@gmail.com, ORCID 0009-0000-5621-1227

## Modern Designs of Arch Load-Bearing Systems of Public Buildings

**Purpose.** The main purpose of the publication is a comparative analysis of the structural variants of the load-bearing arch system for public buildings with insulated covering. The relevance of the work is associated with the modern trend of creating public buildings of various types without internal intermediate supports. The subject of the work is also due to the desire to apply for this purpose known arch systems, which allow to significantly improve the architectural and aesthetic indicators of the building. **Methodology.** To achieve this goal, a project of a grocery and non-food store located in the Lviv region of Ukraine was considered. A circular steel arches with a span of 17.5 m and a sweep angle of 90 ° is the basis of its supporting frame. During the analysis, a comparison of different types of arch cross-sections was performed – welded and rolled I-beam, welded rectangular pipe and seamless round pipe. The finite element method based on the SCAD design and computing complex (Ukraine) was used for the research. **Findings.** The comparative analysis made it possible to determine the geometry of the most rational constructive solution for the given conditions in the form of an I-beam welded cross-section. All other types of cross-sections considered have a lower level of efficiency and manufacturability of manufacture. Additionally, the main «weak» points of such a cross-section were identified and recommendations were given for their elimination. **Originality.** It consists in the fact that the comparative analysis made it possible to assess the possibility of using an arched load-bearing system as a load-bearing element of an unsupported frame of a public commercial building with an insulated roof structure. **Practical value.** It consists in the fact that a structural solution of a small-span steel arch in the form of a welded I-beam has been developed and proposed for practical implementation, which turns out to be approximately 1.5 times less material-intensive than possible analogues. The nature of the distribution of the material efficiency coefficient for given construction conditions has also been obtained.

*Keywords:* steel arch; supporting frame of a building; welded I-beam; public building; grocery and non-food store

### Introduction

Public buildings are nowadays the main place of live communication between people, where they can not only fulfil their social needs, but also have the opportunity to directly contact each other. Surprisingly enough, in the 21st century, due to the extremely powerful and massive development of various means of video communication, the problem of off-line communication is becoming more

acute. Therefore, public buildings, along with their direct functions, are increasingly taking on a communicative social function. It is no wonder that they occupy a special place in the modern classification of buildings and structures [1].

Traditionally, public buildings solve a fairly wide range of public tasks, such as providing educational and training processes, providing health and recreation services, creating conditions for leisure and entertainment, providing public services,

social protection, conducting scientific research and solving design and engineering problems of various levels of complexity, and organising public utilities. However, a significant group of public buildings consists of commercial buildings. And while with respect to non-food products, every year an increasing part of the retail sector is moving to the sphere of direct Internet services, retail space remains necessary for food products. This is due to people's psychology, as people perceive food and the process of eating as something that should be available physically, i.e. off-line. At the same time, people also need to smell the food, which significantly reduces the volume of online sales. Therefore, it is public buildings for food trade and catering that remain the centre of live communication that humanity increasingly seeks in the third millennium.

With this in mind, architects and engineers are also trying to contribute to this process by creating architecturally attractive and imposing commercial buildings. For this purpose, unconventional roof types, non-standard planning solutions or special building materials are often used. Among the engineering systems, arched structures are in particular demand. Such systems have been known since ancient times and gained a special flourishing during the Middle Ages, when their operation and force transmission scheme gradually began to become clear to architects (Fig. 1).

They allow you to cover quite large spans, creating a completely free interior space without additional intermediate supports. However, the «price» for this is the need to arrange special spacers, which often significantly increase the cost and complexity of the object [2, 19]. Therefore, arch systems are currently used mainly for light industrial and warehouse buildings (Fig. 2). To reduce the loads and, accordingly, the bracing forces, the coating of such systems does not contain insulation, which is unacceptable for public buildings. Therefore, the question arises of developing a simple arch system that is also suitable for providing the required temperature and humidity conditions for human habitation.

## Purpose

In view of the above, the main purpose of this publication is to analyse possible constructive options for a small span load-bearing arch system for a public building.

## Methodology

A food and non-food store in one of the districts of the Lviv region of Ukraine was chosen as a base object for consideration. The general view of the facility is shown in Fig. 2, *a*, and the model of its constructive solution in Fig. 2, *b*.

The building has a rectangular shape of the main part with dimensions of 50.77x17.6 m. In terms of architectural and planning solutions, it meets the requirements of current Ukrainian standards [6, 7]. Its main parameters are shown in Table 1. The complex frame consists of thin-walled pleated arch profiles of trough-shaped cross-section and rigid steel structures (arches, purlins, bracing). The folded arch structures are made up of U-shaped bent profiles manufactured by Wedgor metal building systems (USA). The profiles and their cross-sectional proportions are of the MARVELLE type. The profiles (SCAT) are manufactured by Sunward-Ukraine LLC using equipment and under licence from Sunward Corporation. SCAT profiles are installed on top of a rigid frame. The arches of the frame are spaced at an interval that is a multiple of the width of the SCAT profiles along the building.

The structural scheme is based on arched load-bearing elements in the form of circular arches with a span of 17.5 m and a sweep angle of 90°. The spacing of the arches is 3.43 m and was chosen in accordance with the natural and climatic conditions of the construction site, as specified in the Ukrainian standard [5]. The arches are connected by longitudinal purlins made of closed bent-welded profiles. There are five purlins along the span between the arches. Along the length of the building, there are transverse bracing blocks and vertical walls that serve as diaphragms. The braced lattice is made of diamond-shaped corners and a square tube profile according to standards [9, 10, 12]. The spin frame structures are made of shaped tubes. The spacers are connected to the posts by means of assembly welding.

Table 1 *a***Technical characteristics of supermarket**

Characteristic	Value
Land area	0.2209 ha
Building area	1393.7 m <sup>2</sup>
Number of floors	1
Total area	1242.1 m <sup>2</sup>
Construction volume	8884.7 m <sup>3</sup>
Number of workplaces	35 people
Fire resistance class	III
Rentable area	1236.9 m <sup>2</sup>
Projected area	1158.9 m <sup>2</sup>
Trading floor area	817.9 m <sup>2</sup>

*b*

Fig. 1. Arch systems:

*a* – ancient buildings; *b* – modern buildings(for materials on the site <https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fspbsmk>)

The load and impact absorption, structural integrity and rigidity of the frame are ensured by the integrated operation of the arch-type folded structures (SCAT) and the rigid reinforcement frame.

The joint operation of the SCAT and the rigid frame is ensured by fastening the SCAT profiles along the entire length of the upper arch boom and additional fasteners on the purlins. Fastening to the

upper arch booms is provided using M8 bolts of strength class 8.8. The adjacent profiles are each attached to the upper arch booms with a 250 mm spacing.

The consequence class of the building in accordance with the standard [11] is CC2, and the category of responsibility of the structure in accordance with the standard [4] is A. The seismicity of the construction area according to the standard [3] is 6 points, which does not require additional structural anti-seismic measures. Therefore, only traditional natural and climatic loads were considered as the main loads in the analysis of the facility operation.

The steel structures of the building were designed in accordance with the requirements of the standard [8], and the total deformations were limited to the requirements of the standard [9].

The analysis of the steel frame of the building also took into account the requirements of the Chinese standard [18, 19], which in general were somewhat stricter than the requirements of the national standards of Ukraine.

The analysis was carried out with the aid of one of the most widely used numerical methods of structural mechanics in the world – the finite element method [14, 20]. Its practical implementation was envisaged on the basis of the SCAD design and computing complex, Ukraine [15].

### Findings

First of all, we analysed the main structural variant of the arch, which was proposed during the development of the design documentation. It is a welded double-T section (height  $H = 450$  mm, width  $W = 100$  mm, steel C345), the lower flange is reinforced with sheet metal (Fig. 3, *a*).

According to the results of the analysis, the cross-sectional efficiency coefficient was obtained to be 0.66 (Fig. 4). This leaves a certain reserve for the use of the bearing capacity. The mass of one arch is 1377 kg. It was also found that the reinforcement of the lower flange with an additional sheet is necessary to ensure the standard flexibility. In turn, the analysis revealed that the purlins have a utilisation factor of 1.33.

The envelope diagrams of the internal force distribution were obtained from the analysis:  $N$  –

longitudinal force,  $Q$  – transverse force,  $M$  – bending moment (Fig. 5).

To improve the situation, the following changes to the frame structures are recommended, namely:

- reducing the height of the arch section by 110 mm, which for the final version is 340 mm;
- increasing the width of the flanges by 20 mm, which for the final version is 120 mm – this makes it possible to remove the lower reinforcing sheet;
- increasing the cross-section of the square tube purlins from 200x200x6 to 200x200x8.

The resulting final cross-section with all the proposed design improvements is shown in Fig. 3, *b*. In this case, the efficiency coefficient is 0.88, and the mass of the arch has decreased to 945 kg, which is 432 kg less than in the original version.

The analysis also considered additional design options:

- rolled I-beam section, I-beam 30U (steel C345);
- cold-formed welded rectangular section, rectangular square profile 350x152x8 (steel C345);
- hot-rolled round tube 325x8 (steel S255).

It is worth noting that the rolled I-beam section 30U turned out to be similar in terms of performance to the final design, but this section cannot be bent. At the same time, the use of rectilinear fragments contradicts the architectural expressiveness of the project.

It should also be emphasised that in order to increase the load-bearing capacity, this analysis used high-strength steels of the C345 class, which have proven themselves quite effectively both from a theoretical and practical point of view. An assessment of the feasibility and effectiveness of their use for a number of building structures in Ukraine is presented in [18].

The comparison of the considered options is summarised in Table 2. The cost of the profiles is given in the national currency of Ukraine at the prices of the beginning of 2025.

The supporting unit of the arch is shown in Fig. 6.

The envelope diagrams of the internal force distribution for the final arch variant are given in Fig. 7:  $N$  – longitudinal force,  $Q$  – transverse force,  $M$  – bending moment.

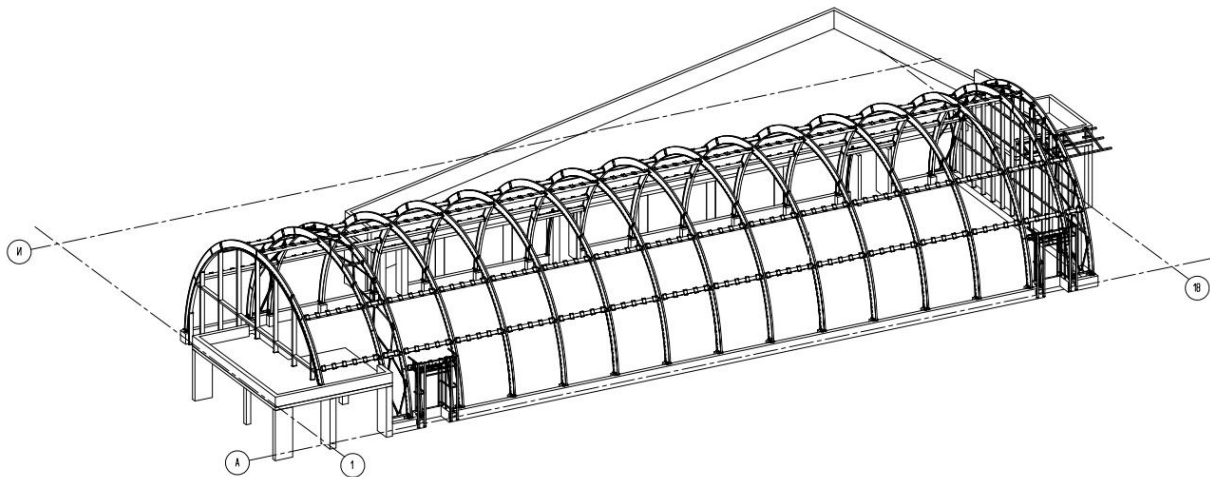
*a**b*

Fig. 2. Supermarket:  
*a* – general view (for materials on the site <https://guide.in.ua/business/622596/atb-маркет-солонка>);  
*b* – structure scheme

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

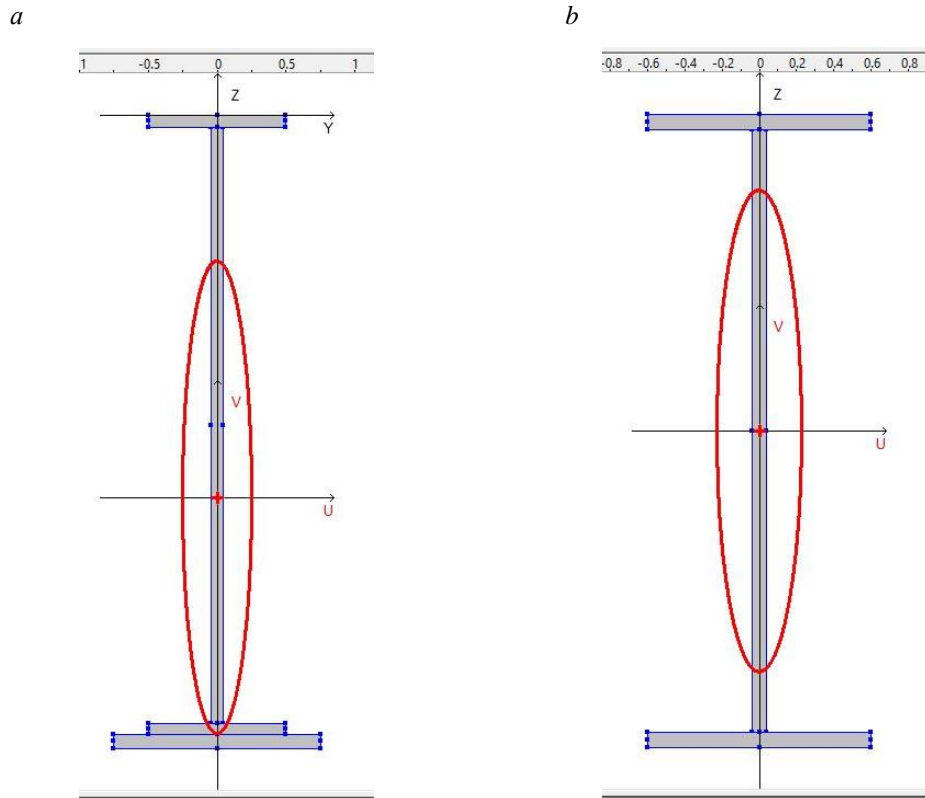


Fig. 3. Arch cross-sections:  
*a* – initial variant; *b* – plan

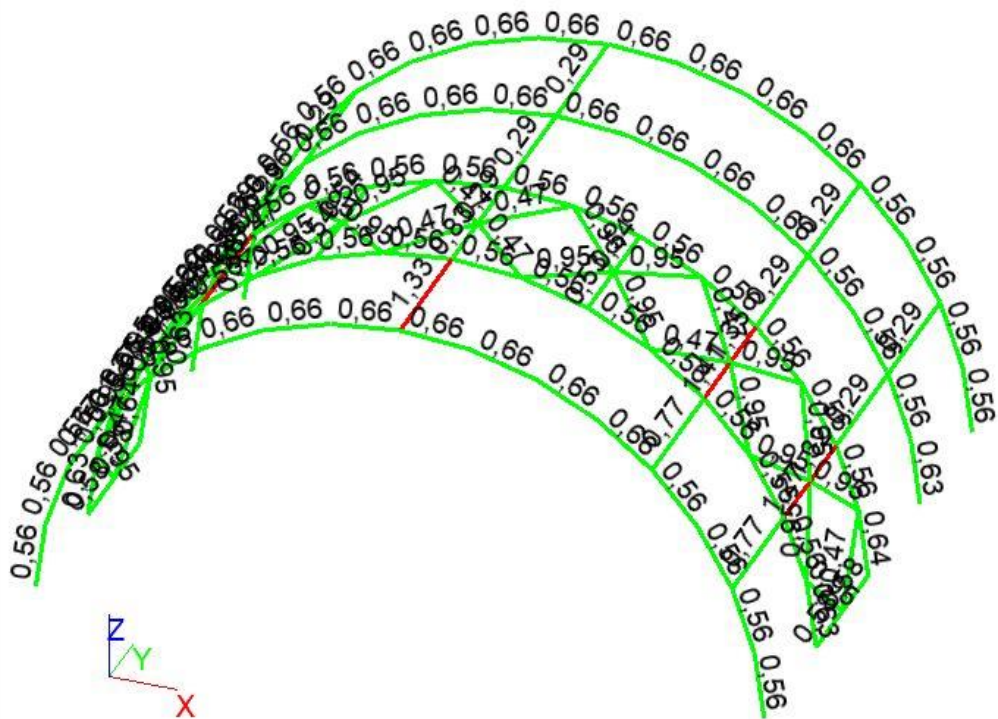
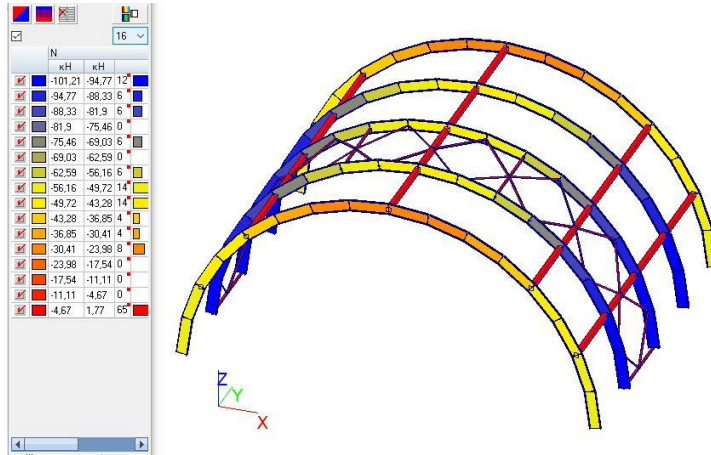


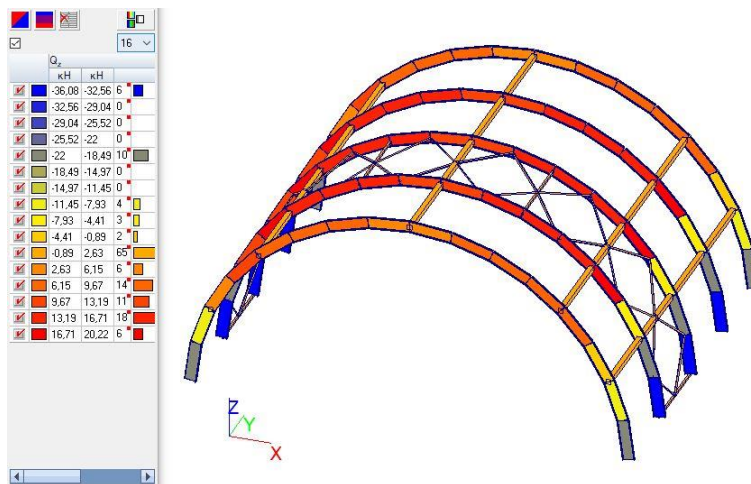
Fig. 4. Effectiveness coefficient in cross-section of the initial variant

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

*a*



*b*



*c*

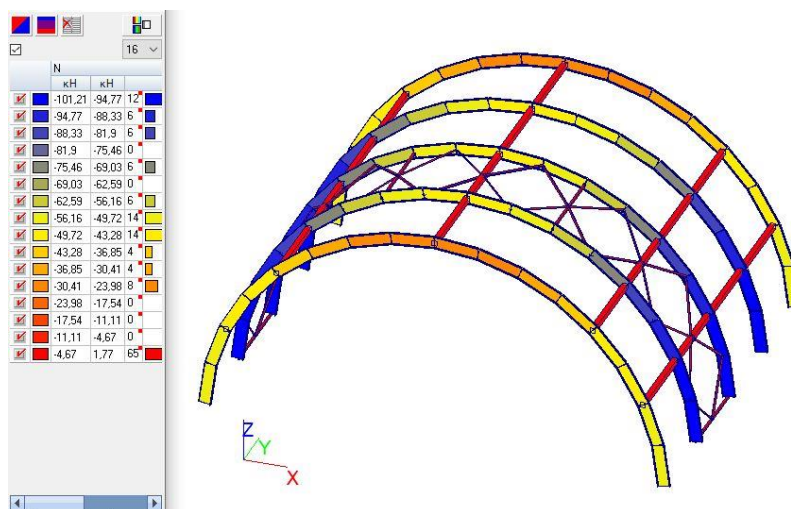


Fig. 5. Design factors in cross-section of the initial variant:  
*a* – envelope diagram of N; *b* – envelope diagram of Q<sub>z</sub>; *c* – envelope diagram of M<sub>y</sub>

Table 2

## Effectiveness of designing variants

Section	Efficiency factor	Weight, kg	Cost, UAH
Welded I-beam section	0.88	945	40 163
Rolled I-beam section	0.90	974	41 395
Rectangular square section	0.98	1576	66 980
Hot-rolled round tube	0.86	1669	70 933

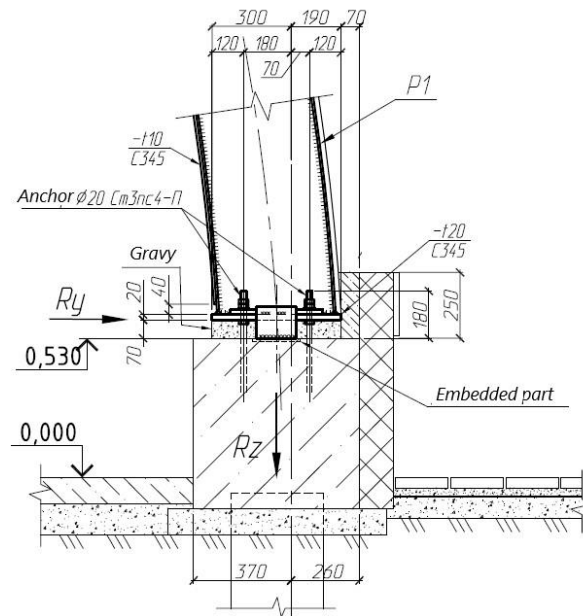


Fig. 6. Supporting unit of the arch section

## Originality and practical value

Thus, this publication presents the results of a comprehensive automated analysis of an arch-type steel load-bearing frame for a food and non-food store in Ukraine. At the same time, the possibility of using an arched load-bearing element for the case of an insulated roof is substantiated and the effectiveness of using it is quantified.

In practical terms, the possible cross-sections of a steel arch bearing element – welded I-beam, hot-rolled I-beam, cold-bent welded rectangular, hot-rolled round tube – are considered, and the most efficient profile is identified as a welded I-beam section. The article also shows the capabilities of modern automated analysis using the SCAD design and computer system developed by Ukrainian specialists.

## Conclusions

The comprehensive comparative automated analysis of possible types of cross-sections for a steel arch bearing element for an insulated roof of a modern city building allows us to state the following:

1. The arched element is quite architecturally expressive and at the same time an economically feasible design solution in this case.

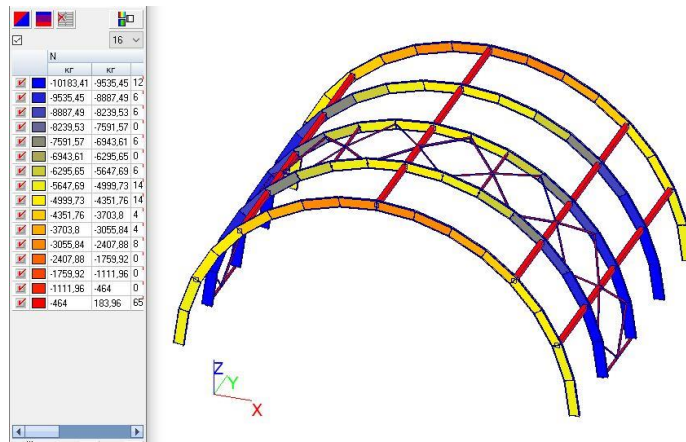
2. For small spans of about 20 m, it is quite effective to use a welded I-beam section, which in terms of weight and cost can be almost twice as rational as existing analogues.

3. Such an architectural and structural solution also does not require the development of massive foundations, since the distribution forces are quite insignificant.

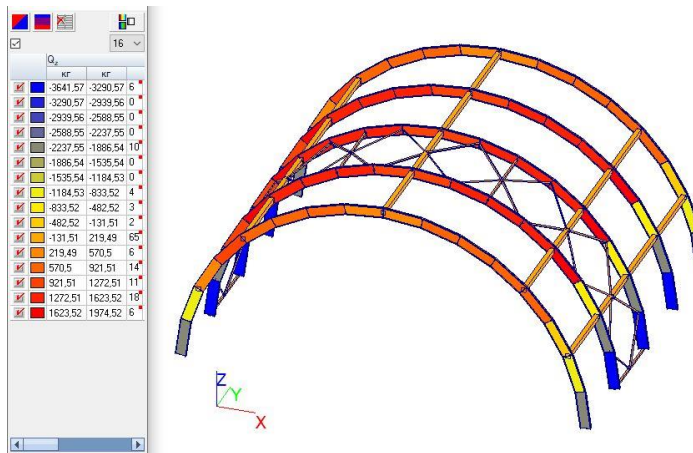
The final design solution of the steel bearing arch presented here meets the minimum requirements of Ukrainian standards.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

*a*



*b*



*c*

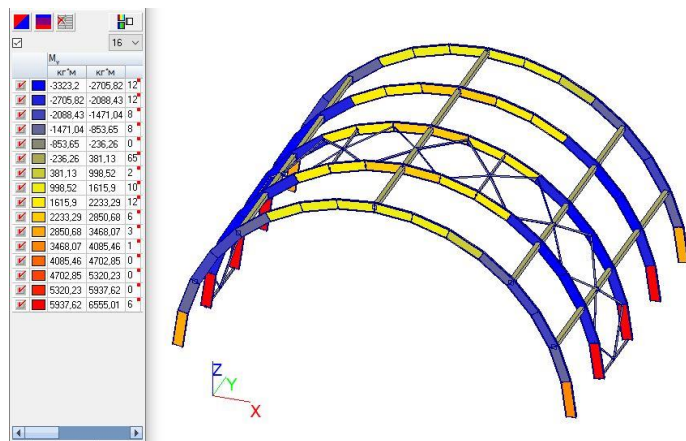


Fig. 7. Design factors in cross-section of the final variant:  
*a* – envelope diagram of  $N$ ; *b* – envelope diagram of  $Q_z$ ; *c* – envelope diagram of  $M_y$

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Банніков Д. О., Нікіфорова Н. А., Косячевська С. М. Сучасний стан класифікації транспортних будівельних конструкцій в Україні. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 21. С. 35–43. DOI: <https://10.15802/bttrp2022/258221>
2. Безсалий В. М., Банніков Д. О. Ефективність сталевих тонкостінних оцинкованих профілів для аркових елементів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. Вип. 16. С. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428>
3. *ДБН В.1.2-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. Зі зміною № 1*. [Чинний від 2014-10-01]. Київ : Мінрегіонрозвитку, буд-ва та ЖКГ України, 2014. 110 с.
4. *ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі зміною № 1*. [Чинний від 2022-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд, 2018. 36 с.
5. *ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі змінами № 1 та № 2* [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2006. 70 с.
6. *ДБН В.2.2-23:2009 Підприємства торгівлі*. [Чинний від 2019-01-08]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2019. 58 с.
7. *ДБН В.2.2-9:2018 Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення. Зі Зміною № 1*. [Чинний від 2022-09-01]. Київ : УКРНДПЦІВІЛЬБУД, 2022. 43 с.
8. *ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1*. [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 220 с.
9. *ДСТУ 2251:2018 Кутики сталеві гарячекатані рівнополічні. Сортамент*. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 10 с.
10. *ДСТУ 8769:2018 Кутики сталеві гарячекатані нерівнополічні. Сортамент*. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 10 с.
11. *ДСТУ 8855:2019 Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності)*. [Чинний від 2019-12-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 17 с.
12. *ДСТУ 8943:2019 Труби сталеві електрозвані. Технічні умови*. [Чинний від 2021-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 20 с.
13. *ДСТУ Б В.1.2-3:2006 Система забезпечення надійності і безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування*. [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Мінбуд України, 2006. 14 с.
14. Bofang Z. *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering*. Singapore : John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2018. 872 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323>
15. Fialko S., Karpilovskiy V. Time history analysis formulation in SCAD FEA software. *Journal of Measurements in Engineering*. 2018. Vol. 6. Iss. 4. P. 173–180. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2018.20408>
16. *GB 50017-2017 Standard for design of steel structures*. [Implementation date 2018-07-01]. Beijing : Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2017. 309 p.
17. *GB/T 700-2006 Carbon structural steels*. [Implementation date 2007-02-01]. The Standardization Administration of the People's Republic of China, 2006. 14 p.
18. Hezentsvei Y. I., Bannikov D. O. Use of fine-grained heat-strengthened steels to increase the operation qualities of bunker capacities from thin-walled galvanized profiles. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. Вип. 1 (91). С. 84–93. DOI: <https://10.15802/stp2021/227198>
19. Kruhlikova N. G., Bannikov D. O. Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. Вип. 2 (80). С. 144–152. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>
20. Luoping Chen L. C., Yan Yang Y. Y. A New Mixed Finite Element Method for Biot Consolidation Equations. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. 2020. Vol. 6. Iss. 12. P. 1520–1541. DOI: <https://doi.org/10.4208/aamm.OA-2019-0174>

А. В. РАДКЕВИЧ<sup>1</sup>, Д. О. БАННИКОВ<sup>2\*</sup>, ДЖ. К. МА<sup>3</sup>, Ю. З. ЛІ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517

<sup>2\*</sup>Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

<sup>3</sup>Каф. «Інтелектуальна будівельна інженерія», Чжецзян Гуанша професійно-технічний університет будівництва, вул. Гуанша Східна, 1, Дон'ян, Китай, 322100, тел. +86 13 19730364030, ел. пошта jianchun@zjgsdx.edu.cn, ORCID 0009-0000-8052-5314

<sup>4</sup>Каф. «Архітектурне проектування», Чжецзян Гуанша професійно-технічний університет будівництва, вул. Гуанша Східна, 1, Дон'ян, Китай, 322100, тел. +86 13918089266, ел. пошта ahltz1944@gmail.com, ORCID 0009-0000-5621-1227

## Сучасні конструкції аркових несних систем громадських будівель

**Мета.** Основною метою публікації є порівняльний аналіз конструкційних варіантів несної аркової системи для громадських будівель з утепленням покриттям. Актуальність роботи пов'язана із сучасною тенденцією до створення громадських будівель різних типів без внутрішніх проміжних опор. Також тематика роботи обумовлена прагненням застосувати для цього відомі аркові системи, які дозволяють суттєво підвищити архітектурно-естетичні показники будівлі. **Методика.** Для досягнення цієї мети було розглянуто проект магазину продовольчих та непродовольчих товарів, розташований у Львівській області України. Основу його несного каркаса становлять циркульні сталеві арки прогоном 17,5 м і кутом розгортки 90°. У ході аналізу виконано зіставлення різних типів поперечних перерізів арки – двотавр зварний та прокатний, труба прямокутна зварна та кругла безшовна. Для досліджень застосовано метод скінченних елементів на базі проектно-обчислювального комплексу SCAD (Україна). **Результати.** Проведений порівняльний аналіз дозволив визначити геометрію найбільш раціонального конструкційного рішення для заданих умов у вигляді двотаврового зварного перерізу. Усі інші розглянуті типи поперечних перерізів мають нижчий рівень ефективності та технологічності виготовлення. Також додатково виявлено основні «слабкі» місця такого перерізу та надано рекомендації щодо їх усунення. **Наукова новизна.** Проведений порівняльний аналіз дозволив оцінити можливість застосування аркової несної системи як несного елемента безопорного каркаса громадської торговельної будівлі з утепленою конструкцією покрівлі. **Практична значимість.** Розроблено та запропоновано до практичної реалізації конструкційне рішення сталевих арки невеликого прогону у вигляді зварного двотавра, матеріаломісткість якої менша приблизно в 1,5 раза за можливі аналоги. Також отримано характер розподілу коефіцієнта ефективності використання матеріалу для заданих умов будівництва.

**Ключові слова:** сталева арка; несний каркас будівлі; зварний двотавр; громадська будівля; магазин продовольчих та непродовольчих товарів

## REFERENCES

1. Bannikov, D. O., Nikiforova, N. A., & Kosiachevska, S. M. (2022). modern state of classification of transport building structures in ukraine. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 21, 35-43. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/258221> (in Ukrainian)
2. Bezalyi, V. M., & Bannikov, D. O. (2019). Efficiency of thin-walled galvanized profiles for arch elements. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 16, 20-29. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428> (in Ukrainian)
3. *Budivnitstvo u seismichnih rajonah Ukrainy, 110 DBV V.1.2-12:2014*. (2014). (in Ukrainian)
4. *Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Zagalni printsipi zabezpechenija nadiynosti ta konstruktivnoj bezpeki budivel I sporud, 36 DBN V.1.2-14:2018*. (2018). (in Ukrainian)
5. *Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya, 70 DBN V.1.2-2:2006*. (2006). (in Ukrainian)
6. *Pidприємства torgivli, 58 DBN V.2.2-23:2009*. (2019). (in Ukrainian)
7. *Budinki i sporudy. Gromadski budinki I sporudy. Osnovni pologjenja, 43 DBN V.2.2-9:2018*. (2022). (in Ukrainian)
8. *Stalevi konstruksiji. Normi proektuvanja, 220 DBN V.2.6-198:2014*. (2014). (in Ukrainian)
9. *Kutiky stalevy harjachekatany rivnopokichny. Sortiment, 10 DSTU 2251:2018*. (2018). (in Ukrainian)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

10. *Kutiky stalevy harjachekatany nerivnopokichny. Sortament, 10 DSTU 8769:2018.* (2018). (in Ukrainian)
11. *Budivli ta sporudy. Vznachennja klasu naslidkiv (vidpovidalnosty), 17 DSTU 8855:2019.* (2019). (in Ukrainian)
12. *Trubi stalevy elektrozvarni. Tekhnichny umovy, 20 DSTU 8943:2019.* (2020). (in Ukrainian)
13. *Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Progini I peremisenja. Vimogy proektuvannya, 14 DSTU B V.1.2-3:2006.* (2006). (in Ukrainian)
14. Bofang, Z. (2018). *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering.* Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323> (in English)
15. Fialko, S., & Karpilovskyi, V. (2018). Time history analysis formulation in SCAD FEA software. *Journal of Measurements in Engineering, 6*(4), 173-180. DOI: <https://doi.org/10.21595/jme.2018.20408> (in English)
16. *Standard for design of steel structures, 309 GB 50017-2017.* (2017). (in English)
17. *Carbon structural steels, 14 GB/T 700-2006.* (2006). (in English)
18. Hezentsvei, Y. I., & Bannikov, D. O. (2021). Use of Fine-Grained Heat-Strengthened Steels to Increase the Operation Qualities of Bunker Capacities from Thin-Walled Galvanized Profiles. *Science and Transport Progress, 1*(91), 84-93. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/227198> (in English)
19. Kruhlikova, N. G., & Bannikov, D. O. (2019). Rational design of short-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and Transport Progress, 2*(80), 144-152.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853> (in English)
20. Luoping Chen, L. C., & Yan Yang, Y. Y. (2020). A New Mixed Finite Element Method for Biot Consolidation Equations. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 12*(6), 1520-1541.  
DOI: <https://doi.org/10.4208/aamm.0a-2019-0174> (in English)

Надійшла до редколегії: 03.02.2025

Прийнята до друку: 13.06.2025

**UDK 624.014.2.072.2:69**A. V. RADKEYVYCH<sup>1</sup>, D. O. BANNIKOV<sup>2\*</sup>, S. P. CHEN<sup>3</sup>, X. F. FU<sup>4</sup><sup>1</sup>Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 307 81 44, e-mail a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517<sup>2\*</sup>Dep. «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679<sup>3</sup>Dep. «Road and Bridge Engineering», Zhejiang Guangsha Vocational and Technical University of Construction, Guangfu East St., 1, Dongyang, Zhejiang, China, 322100, tel. +86 13 621859726, e-mail shangping\_chen@shu.edu.cn, ORCID 0000-0001-5921-3121<sup>4</sup>Dep. «Landscape Engineering», Zhejiang Guangsha Vocational and Technical University of Construction, Guangfu East St., 1, Dongyang, Zhejiang, China, 322100, tel. +86 13 608014609, e-mail 13608014609@163.com, ORCID 0009-0006-7685-6472**Features of modern design of steel crane beams for industrial buildings**

**Purpose.** The main purpose of the publication is to comprehensively compare the methods and approaches to the design of steel crane beams according to the current standards of China and Ukraine. The relevance of the work is due to the constant increase in the volume and types of cooperation between these two countries over the past decades. The subject matter is also related to the increasing use of high-strength steels in construction practice, which also have a number of additional improved performance characteristics. **Methodology.** To achieve this goal, we considered the design of a 6 m span steel simply supported crane beam at one of the modern energy enterprises in Ukraine. The load was assumed to come from an electric overhead crane with a lifting capacity of 25 tones. The selected cross-section was checked in accordance with the design requirements of the current standards of China and Ukraine, which together include about 20 items. Separate consideration was given to the design requirements for the arrangement of reinforcing stiffeners and ensuring local stability of the section elements. **Findings.** The comparative analysis of the existing approaches according to the standards of China and Ukraine has made it possible to establish that, in general, the Chinese standard imposes more stringent requirements both for the material to be used for the crane beam production and for design and construction solutions. At the same time, in terms of ensuring general and local stability, the Chinese standard uses a fundamentally different conceptual approach than the Ukrainian standard. However, the final solution has approximately the same level of bearing capacity. **Originality.** The comparative analysis of the requirements of the current Chinese and Ukrainian standards for the design of steel crane beams has made it possible to identify the strengths and weaknesses of each standard, as well as to outline the main fundamental differences between them. **Practical value.** The paper develops and proposes for practical implementation a design variant of a steel simply supported crane beam, which in terms of its bearing capacity meets the requirements of the current standards of China and Ukraine in the field of metal construction.

**Keywords:** steel crane beam; industrial building; overhead crane; Chinese standard; Ukrainian standard; experience exchange

**Introduction**

Industrial buildings have been and remain the main type of industrial facilities that are designed to ensure real technological processes in all types of economy [1]. Such buildings are created and operated in more than 10 sectors of modern industry (power engineering, mining, metallurgy, chemical production, mechanical engineering, metalworking, construction materials, wood processing, etc.), agriculture, and transport. The volume of construction of new and reconstruction of old industrial buildings is only increasing worldwide from year to year. Therefore, it is still an urgent issue to improve existing approaches to the development of constructive solutions for such build-

ings, the design of their structural elements and systems, as well as methods for the practical implementation of such approaches [20].

Modern industrial buildings are quite complex structural systems (Fig. 1), in which non-standard space-planning solutions, atypical structural schemes, building materials with improved characteristics, and the latest design methods are used to meet the most modern requirements of functional processes.

Recently, the main structural system of industrial buildings has been the frame system. It has a number of advantages compared to other structural systems, including the possibility of flexible layout and, if necessary, easy transformation of

production space, high maintainability and ease of maintenance of structures and technological communications, as well as the ability to implement complex and non-standard structural solutions for load-bearing elements.

As for the material used to manufacture the load-bearing elements of the frame, steel is becoming increasingly common in global practice. This material has high strength characteristics (especially modern high-strength steel grades made using controlled rolling technology [16]) and at the same time makes it possible to create architecturally expressive and aesthetically pleasing structures (especially when using modern BIM technologies for their design).

All of this requires accurate and high-quality approaches to assess the stress-strain state of structures and their components, identify available reserves, and at the same time ensure the required level of reliability and durability of structures. Therefore, the issues of improving existing methods for designing building structures and developing new methods have been and remain relevant.

One of the most critical structural elements of industrial buildings is the crane beam. They serve as a kind of path along which overhead cranes, the main transport mechanism in industrial buildings, move. In order to cover the entire technological space of the building, overhead cranes are placed at a certain height, which is limited by the functional and technological parameters of production. At the same time, the crane beams themselves must also be raised above the floor level of the building, which is achieved through a special design of the frame columns.

From the point of view of operation, crane beams are in an extremely complex stress-strain state. They are subjected to spatial dynamic loads from the movement of overhead cranes, accompanied by a constant change in their intensity over time. However, despite this, engineers create such beams of a fairly simple geometric shape with minimal additional reinforcing elements.

Thus, the design of crane beams is a rather complex and responsible process that requires knowledge and understanding of both theoretical laws and practical experience. This is where international cooperation and partnerships between the

world's leading countries come in handy. It involves the exchange of engineering and technical information and national heritage in the construction industry of individual countries.

Modern China has excellent historical traditions and is a highly developed technological country, so the use of the country's accumulated practical experience in the construction industry is invaluable to the entire world community. So let us look at a kind of symbiosis in the design of steel crane beams associated with the use of the national heritage of two countries – China and Ukraine. We will also try to evaluate this integrated approach in terms of its practical implementation and manufacturing costs. We will pay special attention to the national standards of these two world countries.

### Purpose

In view of the above, the main purpose of this publication is a comprehensive analysis of existing approaches and methods of modern design of steel crane beams for industrial buildings with overhead cranes, based on the international experience of China and Ukraine.

### Methodology

The design of steel crane beams for industrial buildings, like the design of any other steel structures, should be based on standards. In Ukraine, the current standard governing the design of steel structures in general and crane beams in particular is DBN B.2.6–198:2014 [8]. This standard covers not only the design provisions but also provides the basic requirements for the construction of such beams. Therefore, it is a basic document in this aspect.

The applied loads from cranes are determined in accordance with another standard in force in Ukraine – DBN B.1.2–2:2006 [4]. This standard has undergone two changes, the last of which was introduced into design practice in 2023 [5]. It has somewhat streamlined the definition of crane loads for bridge cranes with a lifting capacity of up to 50 tonnes inclusive. Also, when designing crane beams, the standard DSTU B B.1.2–3:2006 [7] is used, which regulates the deformed state of crane beams.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

*a**b*

Fig. 1. Constructive «interior» of the current production environment:

*a* – Interpipe Steel, Dnipro (Ukraine); *b* – Zhejiang Zhanggong Technology Co., Ltd., Dongyang (China)  
(for materials on the site [https://zhang-gong.en.alibaba.com/index.html?spm=a2700.shop\\_index.88.17.597f4ee8ntOw2m](https://zhang-gong.en.alibaba.com/index.html?spm=a2700.shop_index.88.17.597f4ee8ntOw2m))

An additional source to rely on when designing crane beams is the standard SNiP II–23–81\*, which has been cancelled in Ukraine. Despite its status, this standard provides a more classical methodology for assessing the endurance of structures such as crane beams that are subjected to cyclic dynamic loads.

In China, the main regulatory document governing the design of steel structures is GB 50017–

2017 [11]. The determination of loads from overhead cranes is regulated by GB/T 22437.1–2018 [13] and GB/T 22437.5–2021 [14], which are essentially adapted versions of ISO 8686–1:2012(E) [18] and ISO 8686–5:2017(E) [19], respectively. Thus, China's own regulatory framework provides a design process for steel crane beams for industrial buildings.

The object of research is the crane beams of the repair shop of a transformer substation of one of the energy enterprises of Ukraine. According to the current classification of construction facilities in Ukraine, presented in the DSTU 8855:2019 standard [8], energy enterprises are classified as consequence class CC3. This is the most complex and most responsible class, for which the highest values of the responsibility coefficient are set according to the DBN B.1.2–14:2018 [6] –  $\gamma_n = 1.25$  (for calculations for the first group of limit states) and  $\gamma_n = 1.00$  (for calculations for the second group of limit states).

The basic design of the shop is shown in Fig. 2. The shop is made of reinforced concrete according to a wall structural scheme. The crane beams are placed on special horizontal brackets connected to the walls through embedded parts. The span of the crane beams is  $L = 6$  m, their structural scheme is simply supported, and their design scheme is pivoting support on both sides.

An electric bridge crane with a lifting capacity of 25 tonnes is envisaged as the main tool for technological production operations. Its general view along with the layout is shown in Fig. 3. The main technical characteristics of the crane are presented in Table 1.

Table 1

**Technical characteristics of bridge crane**

Characteristic	Value
Crane type	CXTD25t x 20m Hol:22m
Span (Spa)	20.000 m
Load (SWL)	25 000 kg
Crane group	FEM A3
Crane speed	25 m/min
Crane weight	12 040 kg
Crane type	CXTD25t x 20m Hol:22m
Buffer type	D2240
Wheel base (Wb)	4 966 mm
Crane rail in calculation	60*40
Wheel groove	74 mm
Crane travel limit switch	2-step

Table 2 shows the quantitative values of horizontal and vertical forces on the wheels of a bridge crane according to the data of the crane equipment developer. The chart of load distribution on the crane wheels is shown in Fig. 4.

**Findings**

To determine the forces from a bridge crane that will occur in a crane beam, Ukrainian design practice provides for the use of influence lines. This approach is due to the fact that the bridge crane creates a moving load on the crane beam and the question arises of determining the most disadvantageous position of the crane.

In the case of crane beam design, there can generally be two such positions – separately for determining the largest bending moment and separately for determining the largest transverse force.

In the first case, the position of the bridge crane is determined by Winkler's rule, which is formulated as follows: the maximum possible bending moment in a simply supported beam loaded with a system of interconnected moving loads occurs if the equivalent of this system of loads and the load closest to it are equidistant from the beam's centre. The maximum bending moment occurs in this case in the section located under this load.

For the case under consideration, the equalising force of all forces should be located at a distance of  $X_0$  m from the left support of the crane beam:

$$X_0 = \frac{\sum M_0}{R} = \frac{846,59}{321} = 2.64 \text{ m},$$

where  $\sum M_0$  – the total moment of vertical loads on the crane wheels relative to the left support wheel;  $R$  – resultant of vertical loads on the crane wheels.

The dynamic loads on the wheels of the bridge crane were taken into account in these expressions (Table 2); since the crane was manufactured in Germany, the loads were calculated in accordance with the standards of this country DIN 4132 [10] and DIN 15018–1 [9].

The calculation scheme for determining the maximum bending moment is shown in Fig. 5,  $a$  (the critical load is marked in red).

In the second case, the position of the bridge crane is assumed to be as close as possible to the left support of the crane beam. This will generate the maximum transverse force. The calculation

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

scheme for this case is shown in Fig. 5, *b* (the critical load is marked in red).

The calculated values of the internal forces, taking into account the load reliability factors for the crane beam (heavy crane operation is assumed), are significant:

– vertical bending moment

$$M_V = 37\,646 \text{ kN}\cdot\text{cm};$$

– horizontal bending moment

$$M_H = 4\,323 \text{ kN}\cdot\text{cm};$$

– vertical transverse force

$$Q_V = 306 \text{ kN};$$

– horizontal transverse force

$$Q_H = 40 \text{ kN};$$

– longitudinal force

$$N = 0.015 \cdot Q_V \cdot g = 45 \text{ kN}.$$

Based on these values, using the accumulated experience in the design of crane beams, the minimum required cross-section of the I-beam type was determined – Fig. 6, *a*. The cross-section was assumed to be composite welded steel sheets, taking into account the DSTU 8540:2015 standard [2]. Vertical stiffeners were placed in the longitudinal direction at 1 m intervals. In addition, to ensure the overall stability of the beam, it is planned to brace its upper compressed flange in plane – the installation of a bracing beam (Fig. 6, *b*).

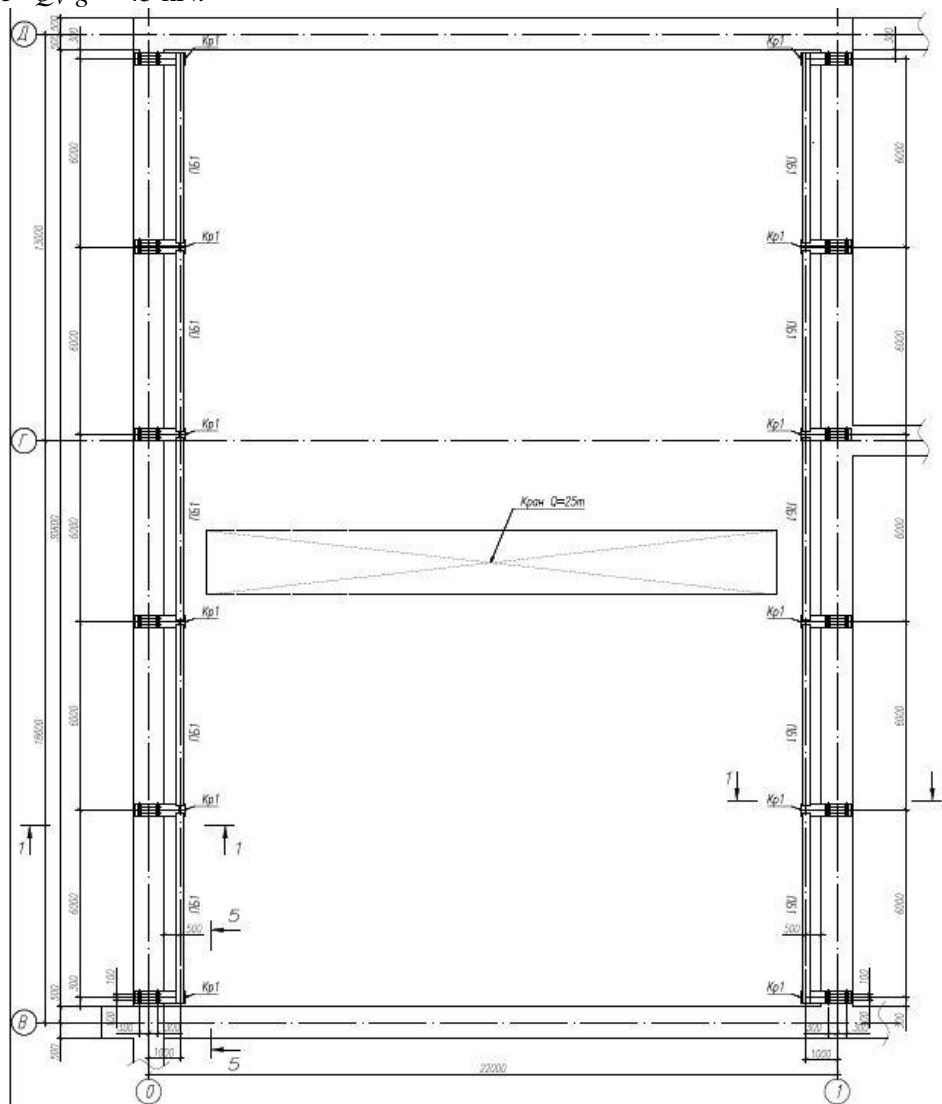
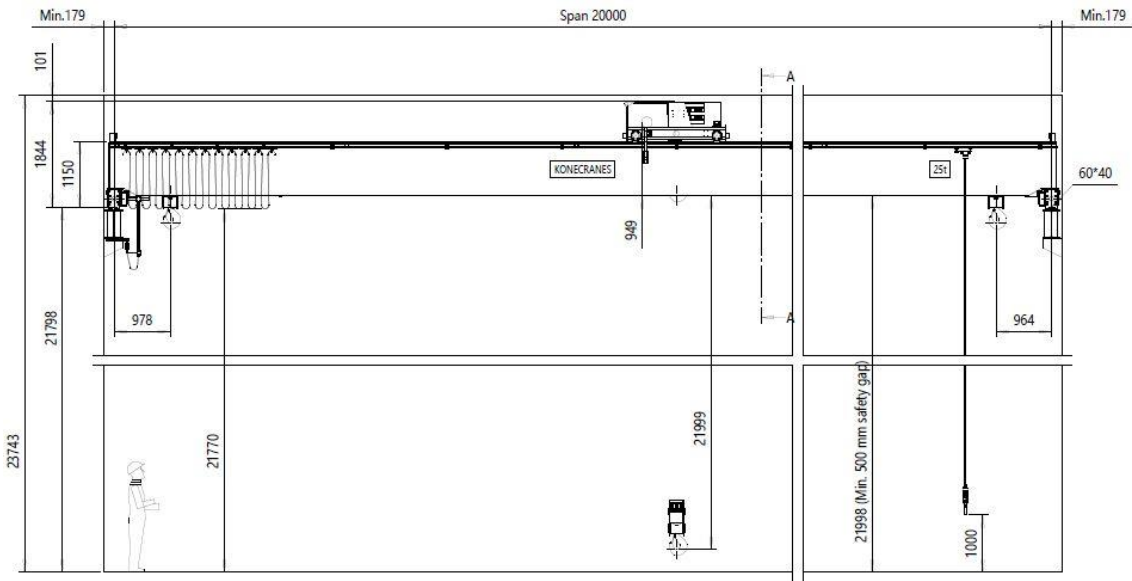


Fig. 2. Repair shop plan

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

a



b

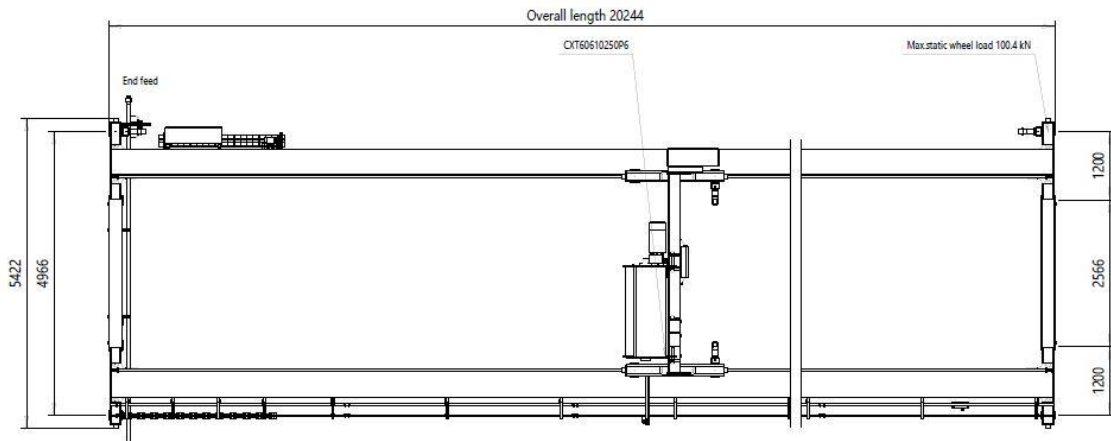


Fig. 3. Bridge crane layout:  
a – frontal view; b – plan

Table 2

Wheel loads of bridge crane

Wheel	NR1	NR2	NR3	NR4	NR5	NR6	NR7	NR8
Vertical wheel loads								
Rmax Stc	100.4 kN	64.0 kN	–	–	53.3 kN	84.8 kN	–	–
Rmin Stc	–	–	20.7 kN	10.1 kN	–	–	8.8 kN	18.9 kN
Rmax Dyn	106.3 kN	68.0 kN	–	–	56.8 kN	89.9 kN	–	–
Rmin Dyn	–	–	22.3 kN	11.2 kN	–	–	9.8 kN	20.4 kN
Horizontal wheel loads								
HSNR= kN	11.7	16.6	2.2	3.2	–3.7	1.2	–0.7	0.2

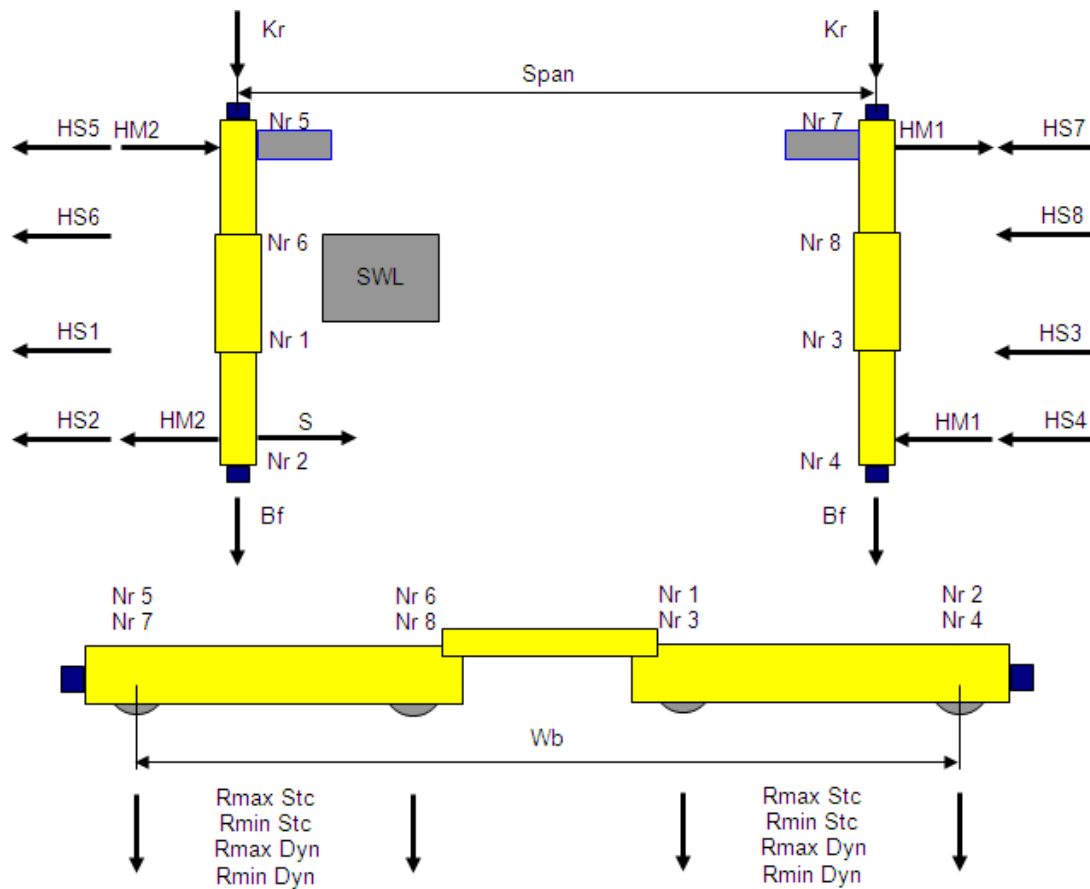


Fig. 4. Load scheme of bridge crane:  
*a* – frontal view; *b* – plan

At the next stage, the determined structural solution of the crane beam was subjected to a comprehensive analysis for compliance with the requirements of the standards of China and Ukraine. The results of this analysis are summarised in Table 3. It presents the main conditions and determines the degree of compliance with these conditions through the efficiency factor  $K$ .

The steel used for the manufacture of the beam cross-section was of class C355 (calculated resistance  $R_y = 350$  MPa), and for the manufacture of the transverse stiffeners – class C235 (calculated resistance  $R_y = 220$  MPa). The use of high-strength steel grades is quite effective in modern conditions and can significantly improve a number of building structure indicators [16, 17].

According to the Chinese standards GB/T 700–2006 [15] and GB/T 19879–2023 [12], Q345GJ (design resistance  $R_y = 345$  MPa) and Q235GJ (design resistance  $R_y = 215$  MPa) steels should be used, respectively. In our opinion, the use of Q355NH and Q235NH steels with improved corro-

sion resistance can be justified in this case, since the production process of the shop involves the presence of an aggressive environment.

It should be noted that according to the Chinese standard GB 50017–2017 [11], all elements of a crane beam belong to different design classes. The class is calculated taking into account a special correction factor, which for the case under consideration is equal to:

- for section elements  $\varepsilon_k = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0.66$ ;
- for stiffeners  $\varepsilon_k = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1.00$ .

For the entire crane beam structure, the design class is S1. Accordingly, certain corrections should be made to the design expressions on the one hand, and on the other hand, the calculation should be supplemented with new items. A summary of this is presented in Table 4. The last column shows the value of the efficiency coefficient by analogy with Table 3.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

The main features of this approach are as follows:

- the difference in the values of the calculated steel resistance in compression and bending does not exceed 3 %;
- the calculation takes into account plastic deformations. However, for structural elements that are designed for endurance, this requirement is advisory;
- local stresses for cranes with increased lifting capacities should be checked with an additional multiplying factor of 1.35;
- the overall stability should be checked only in full expression, taking into account the longitudinal bending stability factor;
- the requirement to install vertical stiffeners is

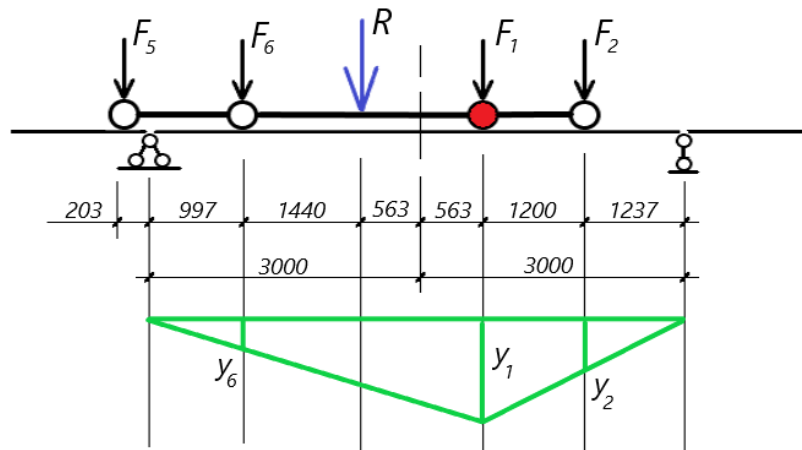
less stringent, as compared to the Ukrainian standard, in terms of the number of vertical stiffeners, which is approximately twice as much;

- the analysis of local stability considers the possibility of torsion of the compressed part of the beam section;

- fundamentally different calculation expressions for determining the critical stresses of loss of local stability, which, compared to the Ukrainian standard, are approximately 2–2.5 times lower. This partially negates the requirement to install stiffeners;

- the minimum overhang of the stiffener must be 15 mm greater than that required by the Ukrainian standard, but the thickness of the stiffener can be about 2.5 times less.

*a*



*b*

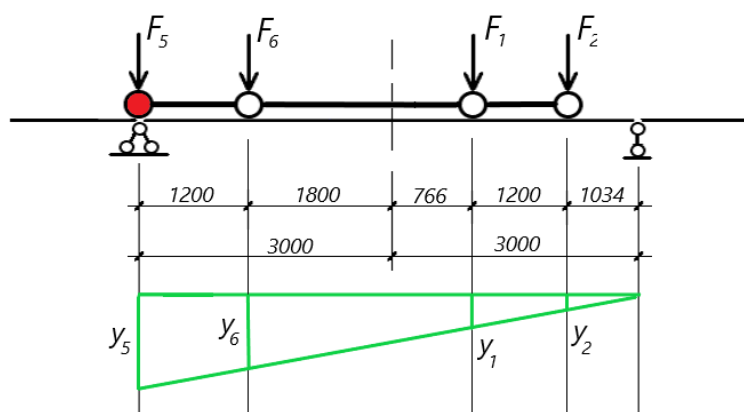
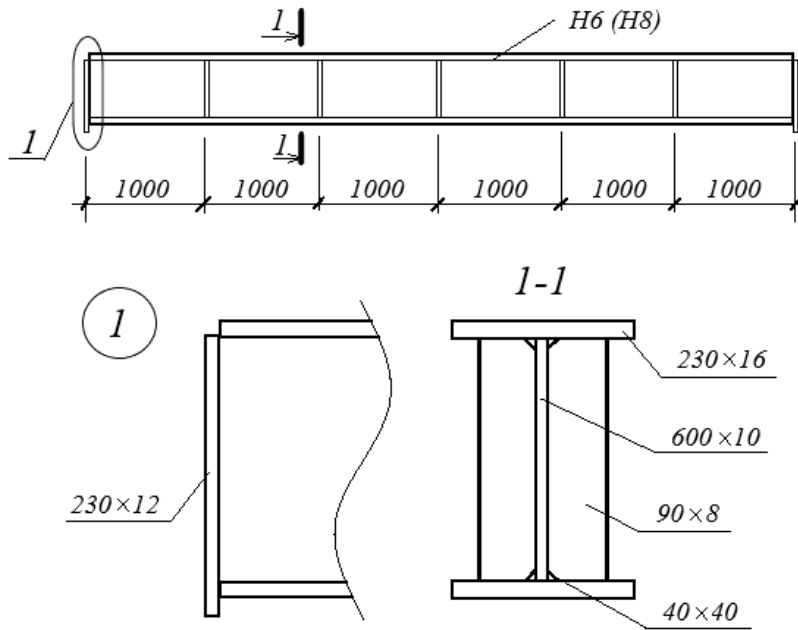


Fig. 5. Calculation scheme of crane beam:

*a* – for maximum bending moment; *b* – for maximum shear force

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

a



b

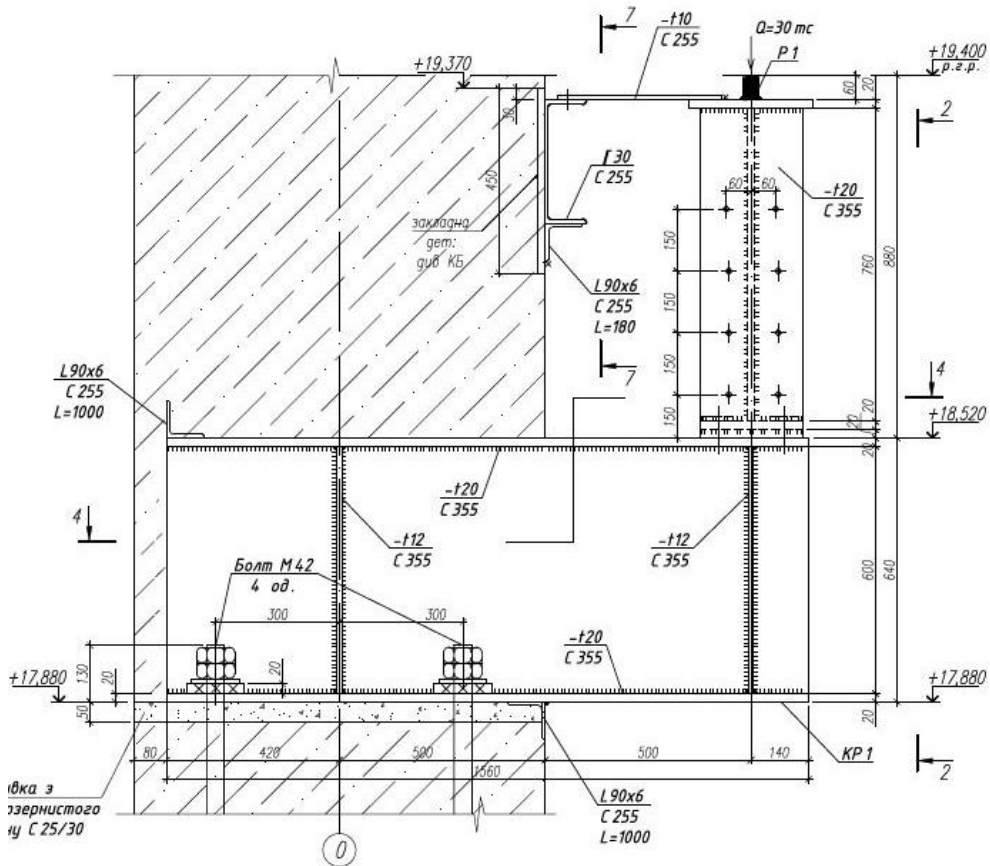


Fig. 6. Cross section of crane beam:  
a – structure scheme; b – support unit

Table 3

## Regulatory conditions for steel crane beam

Condition	K-value
$\frac{M_B}{W_B \cdot R_y} + \frac{M_\Gamma}{W_\Gamma \cdot R_y}$	0.83
$\frac{Q_B}{0.58 \cdot A_w \cdot R_y} + \frac{Q_\Gamma}{0.58 \cdot A_f \cdot R_y}$	0.28
$\frac{0.87}{R_y} \cdot \sqrt{\left(\frac{M_B + \sum \gamma_f \cdot F_1}{W_B} + \frac{\sum \gamma_f \cdot F_1}{4 \cdot l \cdot t_w}\right)^2} - \left(\frac{M_B + \sum \gamma_f \cdot F_1}{W_B} + \frac{\sum \gamma_f \cdot F_1}{4 \cdot l \cdot t_w}\right) \cdot \frac{\sum \gamma_f \cdot F_1}{l \cdot t_w} + \left(\frac{\sum \gamma_f \cdot F_1}{l \cdot t_w}\right)^2 + \left(\frac{Q_B}{t_w \cdot h_w} + \frac{0.3 \cdot \sum \gamma_f \cdot F_1}{l \cdot t_w}\right)^2$	0.45
$\frac{1}{R_y} \cdot \left(\frac{M_B}{W_B} + \frac{\sum \gamma_f \cdot F_1}{4 \cdot l \cdot t_w}\right)$	0.43
$\frac{1}{R_y} \cdot \left(\frac{\sum \gamma_f \cdot F_1}{l \cdot t_w} + \frac{2 \cdot t_w \cdot (1.5 \cdot \sum \gamma_f \cdot F_1 + 0.75 \cdot Q_r \cdot h_r)}{I_r + 0.33 \cdot b_f \cdot t_f^3}\right)$	0.28
$\frac{1}{0.58 \cdot R_y} \cdot \left(\frac{Q_B}{t_w \cdot h_w} + \frac{0.3 \cdot \sum \gamma_f \cdot F_1}{l \cdot t_w} + \frac{t_w \cdot (1.5 \cdot \sum \gamma_f \cdot F_1 + 0.75 \cdot Q_r \cdot h_r)}{2 \cdot (I_r + 0.33 \cdot b_f \cdot t_f^3)}\right)$	0.39
$\frac{\frac{l_f}{b_f} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}}{0.35 + 0.0032 \cdot \frac{b_f}{t_f} + \left(0.75 - 0.02 \cdot \frac{b_f}{t_f}\right) \cdot \frac{b_f}{h_w + t_f}}$	0.32
$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}} \cdot \frac{1}{\lambda_f}$	0.56
$\frac{h_w}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}} \cdot \frac{1}{\lambda_w}$	0.99
$\sqrt{\left(\frac{M_B + \sum \gamma_f \cdot F_1}{W_B \cdot \sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{Q_B}{t_w \cdot h_w \cdot \tau_{cr}}\right)^2}$	0.29
$\frac{M_B}{\sum \gamma_f \cdot W_B \cdot \beta \cdot R_y}$	0.80
$\frac{5 \cdot \delta \cdot M_B \cdot L}{48 \cdot \sum \gamma_f \cdot E \cdot I_B}$	0.42

Continuation of Table 3

Condition	K-value
$\frac{Q_B}{\varphi \cdot b_s \cdot t_s \cdot R_y}$	0.25
$\frac{b_s}{2 \cdot t_f} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}} \cdot \frac{1}{\lambda_s}$	0.68
$\frac{b_h}{t_h} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}} \cdot \frac{1}{\lambda_h}$	0.87

Table 4

## Additional conditions according to the Chinese standard

Condition	K-value
$\frac{M_B}{1.05 \cdot W_B \cdot R_y} + \frac{M_\Gamma}{1.20 \cdot W_\Gamma \cdot R_y}$	0.74
$\frac{1}{R_y} \cdot \frac{1.35 \cdot \sum \gamma_f \cdot F_1}{l \cdot t_w}$	0.25
$\left( \frac{M_B}{W_B \cdot \sigma_{cr}} \right)^2 + \left( \frac{Q_B}{t_w \cdot h_w \cdot \tau_{cr}} \right)^2 + \frac{\sum \gamma_f \cdot F_1}{l \cdot t_w \cdot \sigma_{c,cr}}$	0.47
$\frac{M_B}{\varphi_b \cdot W_B \cdot R_y} + \frac{M_\Gamma}{1.20 \cdot W_\Gamma \cdot R_y}$	0.37

**Value symbols:**  $A$  – area;  $I$  – moment of inertia;  $W$  – moment of resistance;  $b$  – width;  $h$  – height;  $l$  – width of the local stress zone;  $t$  – thickness;  $\beta$  – endurance factor;  $\gamma$  – reliability factor;  $\delta$  – strain factor;  $\lambda$  – slenderness;  $\sigma$  – normal stresses;  $\tau$  – tangential stresses;  $\varphi$  – stability factor

**Index symbols:**  $b$  – beam;  $c$  – local value;  $f$  – beam flange;  $h$  – intermediate stiffener;  $r$  – crane rail;  $s$  – support stiffener;  $w$  – beam wall;  $cr$  – critical value

## Originality and practical value

Thus, this publication provides a comprehensive comparison of the requirements for the design of steel crane beams for industrial buildings with bridge cranes in accordance with the current standards of China and Ukraine. The main differences in the design methodology and their possible consequences are outlined, and recommendations for their elimination are provided.

In practical terms, a structural solution for a steel simply supported crane beam with a span of

6 m for a 25-tonne capacity bridge crane has been developed. This solution covers the requirements of both Chinese and Ukrainian standards in this area. The paper also quantifies the level of compliance of the design solution with the requirements of the standards.

## Conclusions

A comprehensive comparative analysis of methods and approaches to the calculation of steel crane beams (using the example of a 6 m span beam for a 25 tonne crane), laid down in the cur-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

rent standards of China and Ukraine, allows us to state:

1. The design solution must meet a total of about 20 design conditions of the standards.

2. Structural requirements in both standards are limited to the requirements for bracing the upper compressed flange of the beam in the horizontal

direction and the selection of the dimensions of the supporting stiffeners.

3. The Chinese standard generally provides for stricter requirements for the design of steel crane beams.

The final design solution of the steel crane beam shown here meets the minimum requirements of the Chinese and Ukrainian standards.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Банніков Д. О., Нікіфорова Н. А., Косячевська С. М. Сучасний стан класифікації транспортних будівельних конструкцій в Україні. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 21. С. 35–43. DOI: <https://10.15802/bttrp2022/258221>
2. *ДСТУ 8540:2015 Прокат листовий гарячекатаний. Сортамент*. [Чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 11 с.
3. *ДСТУ 8855:2019 Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності)*. Чинний від 2019-12-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 17 с.
4. *ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі змінами № 1 та № 2* [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2006. 70 с.
5. *ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування. Зміна № 2*. [Чинний від 2020-06-01]. Київ : Мінрозв громад та територій, 2020. 10 с.
6. *ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі зміною № 1*. [Чинний від 2022-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд, 2018. 36 с.
7. *ДСТУ Б В.1.2-3:2006 Система забезпечення надійності і безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування*. [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Мінбуд України, 2006. 14 с.
8. *ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1*. [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 220 с.
9. *DIN 15018-1 Cranes; steel structures; verification and analyses*. [Implementation date 1984-11-01]. Berlin, 1984. 38 p.
10. *DIN 4132 Craneways. Steel structures. Principles for calculation. Design and construction*. [Implementation date 1981-02-01]. Berlin, 1981. 32 p.
11. *GB 50017-2017 Standard for design of steel structures*. [Implementation date 2018-07-01]. Beijing : Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2017. 309 p.
12. *GB/T 19879-2023 Steel plate for building structure*. [Implementation date 2024-04-01]. The Standardization Administration of the People's Republic of China, 2023. 17 p.
13. *GB/T 22437.1-2018 Cranes - Design principles for loads and load combinations. Part 1: General*. [Implementation date 2018-05-14]. The Standardization Administration of the People's Republic of China, 2018. 52 p.
14. *GB/T 22437.5-2021 Cranes - Design principles for loads and load combinations. Part 5: Overhead travelling and portal bridge cranes*. [Implementation date 2022-07-01]. The Standardization Administration of the People's Republic of China, 2021. 28 p.
15. *GB/T 700-2006 Carbon structural steels*. [Implementation date 2007-02-01]. The Standardization Administration of the People's Republic of China, 2006. 14 p.
16. Hezentsvei Y. I., Bannikov D. O. Use of fine-grained heat-strengthened steels to increase the operation qualities of bunker capacities from thin-walled galvanized profiles. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. Вип. 1 (91). С. 84–93. DOI: <https://10.15802/stp2021/227198>
17. Hezentsvei Yu., Bannikov D. Effectiveness evaluation of steel strength improvement for pyramidal-prismatic bunkers. *Eureka: Physics and Engineering*. 2020. No. 2 (27). P. 30–38. DOI: <https://10.21303/2461-4262.2020.001146>

18. ISO 8686-1:2012(E) *Cranes - Design principles for loads and load combinations. Part 1: General*. [Implementation date 2013-01-01]. Switzerland, 2012. 54 p.
19. ISO 8686-5:2017(E) *Cranes - Design principles for loads and load combinations. Part 5: Overhead travelling and portal bridge cranes*. [Implementation date 2018-01-01]. Switzerland, 2017. 34 p.
20. Kruhlikova N. G., Bannikov D. O. Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. Вип. 2 (80). С. 144–152.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>

А. В. РАДКЕВИЧ<sup>1</sup>, Д. О. БАННИКОВ<sup>2\*</sup>, Ш. П. ЧЕН<sup>3</sup>, С. Ф. ФУ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта [a.v.radkevich@ust.edu.ua](mailto:a.v.radkevich@ust.edu.ua), ORCID 0000-0001-6325-8517

<sup>2\*</sup>Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта [d.o.bannikov@ust.edu.ua](mailto:d.o.bannikov@ust.edu.ua), ORCID 0000-0002-9019-9679

<sup>3</sup>Каф. «Дорожнє і мостове будівництво», Чжецзян Гуанша професійно-технічний університет будівництва, вул. Гуанша Східна, 1, Доньян, Китай, 322100, тел. +86 13 621859726, ел. пошта [shangping\\_chen@shu.edu.cn](mailto:shangping_chen@shu.edu.cn), ORCID 0000-0001-5921-3121

<sup>4</sup>Каф. «Ландшафтна інженерія», Чжецзян Гуанша професійно-технічний університет будівництва, вул. Гуанша Східна, 1, Доньян, Китай, 322100, тел. +86 13 608014609, ел. пошта [13608014609@163.com](mailto:13608014609@163.com), ORCID 0009-0006-7685-6472

## Особливості сучасного проєктування сталевих підкранових балок виробничих будівель

**Мета.** Ця публікація спрямована на комплексне зіставлення методик та підходів до проєктування сталевих підкранових балок за чинними стандартами Китаю та України. Актуальність роботи обумовлена постійним нарощуванням обсягів та різновидів співпраці між цими двома країнами протягом останніх десятиріч. Також тематика роботи пов'язана з усе більш широким упровадженням в будівельну практику сталей підвищеної міцності, які мають низку додаткових покращених експлуатаційних характеристик. **Методика.** Розглянуто проєкт сталеві розрізної підкранові балки прогоном 6 м одного із сучасних енергетичних підприємств України. Навантаження було передбачено від електричного мостового крана вантажопідйомністю 25 т. Перевірку підібраного перерізу проведено відповідно до розрахункових вимог чинних стандартів Китаю та України, які в сукупності налічують близько 20 позицій. Окремо враховано наведені в стандартах конструкційні вимоги щодо влаштування кріпильних ребер жорсткості та забезпечення місцевої стійкості елементів перерізу. **Результати.** Проведений порівняльний аналіз чинних підходів за стандартами Китаю та України дозволив установити, що в цілому стандарт Китаю висуває більш жорсткі вимоги як для матеріалу, з якого виготовляють підкранові балки, так і до розрахунково-конструкційних рішень. При цьому в частині забезпечення загальної і місцевої стійкості в стандарті Китаю використано принципово інший концептуальний підхід, ніж у стандарті України. Проте остаточне рішення має приблизно однаковий рівень несної здатності. **Наукова новизна.** Проведений порівняльний аналіз вимог чинних стандартів Китаю та України в частині проєктування сталевих підкранових балок дозволив виявити слабкі та сильні сторони кожного із стандартів, а також окреслити основні принципові розбіжності між ними. **Практична значимість.** Розроблено та запропоновано до практичної реалізації конструкційний варіант сталеві розрізної підкранові балки, яка за своїми показниками несної здатності в сукупності відповідає вимогам чинних стандартів Китаю та України в галузі металобудівництва.

**Ключові слова:** сталева підкранова балка; виробнича будівля; мостовий кран; стандарт Китаю; стандарт України; обмін досвідом

## REFERENCES

1. Bannikov, D. O., Nikiforova, N. A., & Kosiachevska, S. M. (2022). modern state of classification of transport building structures in ukraine. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 21, 35-43.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/258221> (in Ukrainian)
2. *Prokat listovoy harjachekatanniy. Sortiment, 11 DCTU 8540:2015*. (2016). (in Ukrainian)
3. *Budivli ta sporudy. Viznachennja klasu naslidkiv (vidpovidalnosti), 17 DSTU 8855:2019*. (2019). (in Ukrainian)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. *Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya, 70 DBN V.1.2-2:2006.* (2006). (in Ukrainian)
5. *Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya. Zmina No 2, 10 DBN V.1.2-2:2006.* (2020). (in Ukrainian)
6. *Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Zagalni printsipi zabezpechenija nadiynosti ta konstruktivnoj bezpeki budivel'nykh I sporud, 36 DBN V.1.2-14:2018.* (2018). (in Ukrainian)
7. *Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Progini I peremisenja. Vimogy proektuvannya, 14 DSTU B V.1.2-3:2006.* (2006). (in Ukrainian)
8. *Stalevi konstruktsiji. Normi proektuvanja, 220 DBN V.2.6-198:2014.* (2014). (in Ukrainian)
9. *Cranes; steel structures; verification and analyses, 38 DIN 15018-1.* (1984). (in English)
10. *Craneways. Steel structures. Principles for calculation. Design and construction, 32 DIN 4132.* (1981). (in English)
11. *Standard for design of steel structures, 309 GB 50017-2017.* (2017). (in English)
12. *Steel plate for building structure, 17 GB/T 19879-2023.* (2023). (in English)
13. *Cranes - Design principles for loads and load combinations. Part 1: General, 52 GB/T 22437.1-2018.* (2018). (in English)
14. *Cranes - Design principles for loads and load combinations. Part 5: Overhead travelling and portal bridge cranes, 28 GB/T 22437.5-2021.* (2021). (in English)
15. *Carbon structural steels, 14 GB/T 700-2006.* (2006). (in English)
16. Hezentsvei, Y. I., & Bannikov, D. O. (2021). Use of Fine-Grained Heat-Strengthened Steels to Increase the Operation Qualities of Bunker Capacities from Thin-Walled Galvanized Profiles. *Science and Transport Progress, 1*(91), 84-93. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/227198> (in English)
17. Hezentsvei, Y., & Bannikov, D. (2020). Effectiveness evaluation of steel strength improvement for pyramidal-prismatic bunkers. *Eureka: Physics and Engineering, 2*, 30-38. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001146> (in English)
18. *Cranes - Design principles for loads and load combinations. Part 1: General, 54 ISO 8686-1:2012(E).* (2012). (in English)
19. *Cranes - Design principles for loads and load combinations. Part 5: Overhead travelling and portal bridge cranes, 34 ISO 8686-5:2017(E).* (2017). (in English)
20. Kruhlikova, N. G., & Bannikov, D. O. (2019). Rational design of short-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and Transport Progress, 2*(80), 144-152. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853> (in English)

Надійшла до редколегії: 29.01.2025

Прийнята до друку: 09.06.2025

## УДК 624.87:624.042-047.37

К. М. ПЕРЕПЕЛИЦЯ<sup>1\*</sup>, С. В. КЛЮЧНИК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 738 54 25, ел. пошта kirill\_perpelitsa@ukr.net, ORCID 0009-0006-4454-7237

<sup>2</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(050) 667 40 49, ел. пошта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

## Дослідження елементів понтонного мосту з огляду на сучасні виклики щодо вантажопідйомності

**Мета.** Основною метою цієї роботи є: дослідження сучасних вимог до наплавних засобів із подолання водних перешкод; адаптація нормативного гусеничного навантаження до стандарту динамічних ефектів гусеничних та колісних військових навантажень країн НАТО; моделювання елементів понтонного мосту НЖМ–56 за допомогою програмного забезпечення для дослідження його під дією сучасного навантаження; дослідження напружено-деформованого стану елементів мосту для встановлення його вантажопідйомності. **Методика.** У роботі проаналізовано сучасні вимоги за вантажопідйомністю до понтонних систем з огляду на виклики сьогодення, із використанням досвіду країн НАТО з військової класифікації вантажопідйомності штучних споруд. Визначено внутрішні зусилля в елементах понтонного мосту під дією сучасного рухомого навантаження за методом ліній впливу. Застосовано програмне забезпечення, що реалізує метод скінченних елементів, для дослідження понтонного мосту. **Результати.** Досліджено вимоги сучасного стандарту країн НАТО щодо військових навантажень. Проведено адаптивний перерахунок моделі гусеничного навантаження, під пропуск якого була спроектована конструкція до тієї, що відповідає стандарту військових навантажень країн НАТО. Отримано результати внутрішніх зусиль у балках прогонової будови мосту. **Наукова новизна.** Відтворено елементи моделі понтонного мосту, який застосовують для подолання водних перешкод у ході відсічі збройної агресії РФ, за допомогою програмного забезпечення, що дозволяє дослідити роботу понтонної системи (наявного ресурсу), а установити реальну вантажопідйомність мосту з урахуванням вимог стандарту країн НАТО за навантаженням. Адаптовано вітчизняне гусеничне навантаження до вимог країн НАТО за класифікацією військових транспортних засобів. **Практична значимість.** Установлення вантажопідйомності елементів понтонного мосту дасть змогу раціонально використовувати наявний ресурс, здійснювати пропуск сучасного навантаження відповідно до викликів сьогодення, а також оптимізувати та модернізувати конструкції мосту. Визначення відповідності класифікації вітчизняного навантаження вимогам країн НАТО допомагає забезпечити пропуск наявної техніки по штучних спорудах, класифікованих за сучасними стандартами.

**Ключові слова:** наплавні (понтонні) мости; вантажопідйомність; подолання водних перешкод; функціонування транспортної інфраструктури; Military Load Classification (MLC); метод ліній впливу; моделювання наплавних систем; метод скінченних елементів

### Вступ

Унаслідок повномасштабної збройної агресії зс РФ проти України зруйновано велику кількість штучних споруд, які входять до складу транспортної системи, деякі з них уже відновлені підрозділами сил безпеки й оборони України та продовжують функціонувати [6]. Пошкоджені об'єкти на деокупованій території підлягають відбудові, але виконання робіт у районах, де рівень небезпеки з боку ворога не спадає, є недо-

цільним. Для відновлення транспортного сполучення застосовують понтонні системи, наведення дублювальних мостів під час технічного прикриття важливих об'єктів національної транспортної інфраструктури [4], що також є актуальним способом подолання водних перешкод в умовах війни [9] та інших кризових ситуаціях [10].

Сучасні вимоги до понтонних систем за вантажопідйомністю продиктовані потребою сьогодення щодо пропуску вітчизняної, а також наданої іноземними партнерами військової техніки

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

підвищеної маси з необхідністю забезпечити її мобільність в умовах бойових дій.

Інженерні та понтонно-мостові підрозділи мають на озброєнні штатні засоби для подолання водних перешкод, після повномасштабного вторгнення зс рф їх чисельність була доповнена засобами, наданими країнами-партнерами [1], а також наплавними системами, використаними військами ворога та залишеними на території України під час відступу (трофейні мости). [7]. Рациональне та надійне застосування цих засобів для подолання водних перешкод можливе за умови ретельного дослідження їх технічного стану та вантажопідйомності, на основі яких можна отримати реальні рекомендації із врахуванням потреби в пропуску заданого навантаження на визначеній ділянці.

У чинному нормативному документі [5] не встановлено моделі тимчасового гусеничного навантаження для розрахунку елементів мостових конструкцій. Практичний досвід і нагальна необхідність із пропуску через мости сучасної гусеничної військової техніки вказують на важливість специфіки такого виду тимчасового навантаження та перспективне зростання його маси. Останнім документом, який визначає особливості гусеничного навантаження, є СНиП 2.05.03–84 (Мости та труби), але сьогодні він нечинний. Ним встановлене максимальне нормативне гусеничне навантаження НГ–60, прийняте за моделлю (рис. 1).

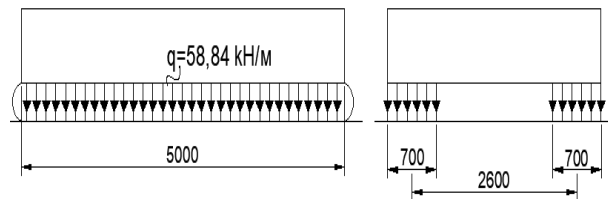


Рис. 1. Гусеничне навантаження НГ–60

Fig. 1. Tracked loader NG-60

У країнах-членах НАТО запроваджена військова класифікація вантажопідйомності [12], що поділяє одиниці військової техніки на класи, номери яких відповідають фактичній вазі із урахуванням лінійних розмірів бази автомобіля, а також його ширини і висоти.

Встановити значення вантажопідйомності понтонної системи, а також надати рекомендації щодо організації пропуску навантаження по ній

можна за допомогою методу ліній впливу із застосуванням еквівалентного навантаження, а також за допомогою імітаційного моделювання з використанням програмного забезпечення, що реалізує метод скінченних елементів.

### Мета

Основною метою цієї статті є: визначення внутрішніх зусиль у головних балках прогонової будови для встановлення вантажопідйомності понтонного мосту наявного матеріального ресурсу, який використовують для подолання водних перешкод в умовах війни та для забезпечення логістичного зв'язку; аналіз тимчасового нормативного навантаження, що актуально для застосування під час проведення розрахунку вантажопідйомності елементів понтонного мосту; вивчення класифікації військової техніки за вантажопідйомністю, яку використовують в країнах членах НАТО, а також проведення перерахунку моделі вітчизняного навантаження на модель класу MLC зі встановленням її адаптованого значення.

### Методика

Із початком повномасштабного вторгнення зс рф в Україну інженерні підрозділи організували переправи через водні перешкоди для забезпечення діяльності сил безпеки та оборони в наданні відсічі збройній агресії та підтриманні логістичного зв'язку країни. Більшість наявних засобів для подолання водних перешкод, які використовують сьогодні, спроектовані в середині минулого століття згідно з нормами за навантаженням, що діяли на той час. З урахуванням реального досвіду застосування понтонних систем мостів, наведених за викликами сьогодення, та нетипових схем збирання [2] слід зазначити, що умови війни спричинили потребу в забезпеченні підвищеної пропускної спроможності та вантажопідйомності під час подолання водних перешкод підрозділами. Це потребує встановлення та наукового обґрунтування реального значення вантажопідйомності штатних засобів для подолання водних перешкод.

Використовувана в країнах-членах НАТО військова класифікація навантаження мостів, промів, плотів та транспортних засобів визначена, стандартизована та описана в [12]. Цим докуме-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

нтом встановлено 32 стандартні класи (16 гусеничних і 16 колісних транспортних засобів) для використання в проєктуванні, випробуванні та застосуванні військових мостів. Числове значення, яке відображає вантажопідйомність мосту та відповідність транспортного засобу MLC, містить значення маси транспортного засобу з урахуванням його геометрії (довжини і ширини), його використовують для оцінки здатності військового транспортного засобу переходити через штучну споруду як засіб для подолання перешкоди безпечно та без її пошкодження. Цей нормативний документ дозволяє керівнику під час планування переміщення особового складу організувати раціональне використання наявних засобів для подолання перешкоди, де це необхідно, та надати вказівки щодо порядку проведення необхідної передислокації.

Загальну процедуру випробувань штучних споруд у країнах-членах НАТО проводять для встановлення їх вантажопідйомності за [11] (Тристоронній кодекс проєктування та випробування військового мостового обладнання). Випробування на міцність (рис. 2) проводять із перевантаженням на 30 та 50 % від нормативного робочого навантаження, а також випробовують на необхідну кількість переїздів (рис. 3).



Рис. 2. Випробування на міцність елементів мосту

Fig. 2. Strength testing of bridge elements



Рис. 3. Випробування мосту на циклічність

Fig. 3. Cycling test of the bridge

Порядок розрахунку значення MLC військового транспортного засобу наведено в стандарті [12], відповідно до якого початковим етапом є розрахунок згинального моменту, розподіленого на одиницю довжини прогону, що створює транспортний засіб у прогонах від 1 до 100 м. Наступним етапом є визначення приблизного значення MLC шляхом лінійної інтерполяції між кривими одиничного згинального моменту (рис. 4) гіпотетичних транспортних засобів у точці, яка дає найбільше значення MLC.

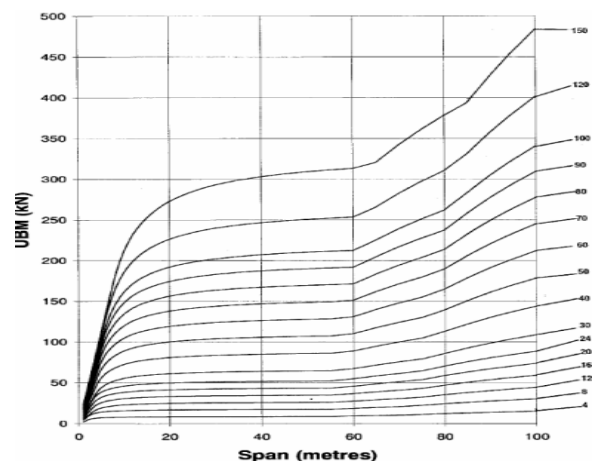


Рис. 4. Графік залежності одиничних згинальних моментів (вісь Y) у прогонах від 1 до 100 м (вісь X) для отримання значення MLC

Fig. 4. Graph of the dependence of unit bending moments (Y-axis) in runs from 1 to 100 m (X-axis) to obtain the MLC value

Якщо значення MLC для військового транспортного засобу включає в себе не лише його вагу, а й геометричні розміри, то слід порівняти

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

фактичну ширину транспортного засобу з шириною гіпотетичного транспортного засобу, чий MLC найближчий, та за необхідності застосувати коефіцієнт корекції розміру транспортного засобу за допомогою графіка корекції ширини (рис. 5), нахил лінії на графіку  $6/25,4$  ( $6\% = 25,4$  см).

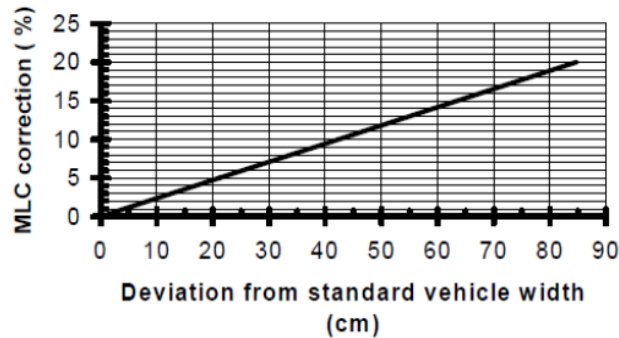


Рис. 5. Графік корекції ширини транспортного засобу

Fig. 5. Graph of vehicle width correction

### Результати

Для отримання адаптованого значення MLC моделі транспортного засобу, що відображає гусеничну модель максимального гусеничного навантаження НГ–60 за вітчизняними нормами (рис. 1), необхідно провести розрахунок за описаною методикою відповідно до стандарту [12].

Отримати значення згинального моменту, розподіленого на одиницю довжини прогону, що виникає від моделі гусеничного навантаження НГ–60, запропоновано з дослідження розрахункової схеми річкової частини (вивідний паром) наплавного залізничного мосту НЖМ–56 довжиною 37,5 м, який складається із шести секцій металевих прогонових будов автомобільного проїзду на плавних опорах (рис. 6).

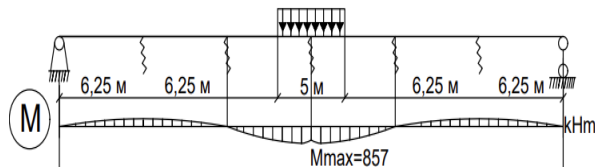


Рис. 6. Розрахункова схема прогонової будови автомобільного проїзду наплавного мосту НЖМ–56

Fig. 6. Design scheme of the roadway span structure of the NZhM–56 pontoon bridge

З аналізу вигляду епюри згинального моменту та максимального його значення слід зробити висновок, що сприйняття та розподіл тимчасового навантаження відбувається в тому числі за рахунок пружної роботи плавних опор, отже, отримане значення максимального згинального моменту не актуальне для визначення значення MLC транспортного засобу порівняно з класичною прогоновою будовою на двох статичних опорах. Для отримання значення згинального моменту, розподіленого на одиницю довжини прогону, що виникає від моделі гусеничного навантаження НГ–60, обираємо розрахункову схему прогону наявних на довготривалому зберіганні та часто вживаних для відновлення транспортних об'єктів прогонових будов, що виготовлені зі зварних широкополічних двотаврових балок довжиною 18,53 м [3] (рис. 7).

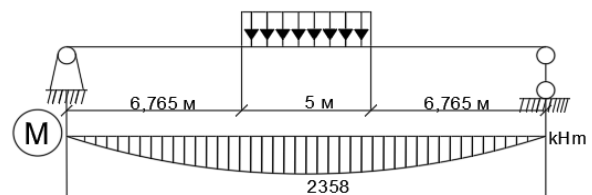


Рис. 7. Розрахункова схема прогонової будови, виготовленої зі зварних широкополічних двотаврових балок

Fig. 7. Design diagram of a span structure made of welded wide-beam double-tab beams

Із значення згинального моменту  $M = 2\,358$  кН×м, що виникає в прогоні довжиною 18,53 м від тимчасового навантаження НГ–60 (рівномірно розподіленої сили  $q = 117,72$  кН/м), отримуємо одиничний момент, що дорівнює 127,25 кН. За допомогою графіка залежності (рис. 4) встановлюємо приблизне значення MLC шляхом лінійної інтерполяції між кривими одиничного згинального моменту. Значення MLC гіпотетичного транспортного засобу перебуває в межах між MLC 60 та MLC 70, характеристики яких відповідно до [12] зазначено на рис. 8. Значення одиничних згинальних моментів згідно з рис. 4 для MLC 60 становить 115 кН, для MLC 70 – 135,5 кН.

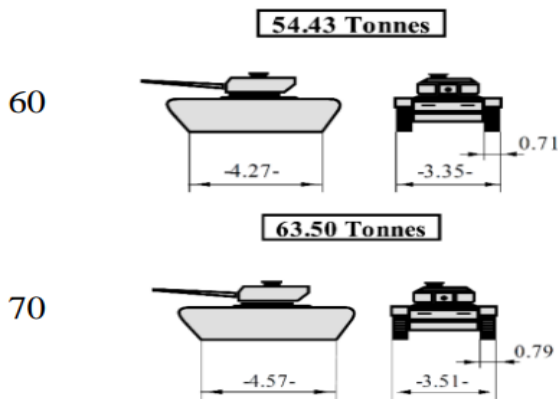


Рис. 8. Геометричні та вагові характеристики MLC 60 та MLC 70

Fig. 8. Geometric and weight characteristics of the MLC 60 and MLC 70

Для встановлення остаточного значення MLC сформуємо таке рівняння:

$$\frac{135,5 - 115}{70 - 60} = \frac{127,25 - 115}{MLC - 60};$$

$$(135 - 115)(MLC - 60) = (127,25 - 115)(70 - 60);$$

$$MLC \approx 66.$$

На основі відомих значень ширини транспортних засобів MLC 60 та MLC 70 встановлюємо, що ширина MLC 64 становить 3,45 м, а ширина гіпотетичного транспортного засобу становить 3,3 м. Для отримання остаточного значення необхідно застосувати коефіцієнт корекції розміру транспортного засобу (рис. 5):

$$k = 1 + \left[ \frac{6\%}{25,4 \text{ см}} \times \frac{100 \text{ см}}{1 \text{ м}} \times (3,45 \text{ м} - 3,3 \text{ м}) \times \frac{1}{100\%} \right] = 1,0345.$$

Отже, модель вітчизняного гусеничного навантаження НГ–60 відповідає значенню MLC гіпотетичного транспортного засобу із урахуванням коефіцієнта корекції розміру ТЗ становить MLC 68 (рис. 9).

Сьогодні для подолання водних перешкод у ході відсічі збройної агресії важливу роль відіграють наявні вітчизняні наплавні системи мостів, проте під час їх застосування необхідно зважати на виклики за вантажопідйомністю мостів, пов'язані з наданням сучасної військової техніки країнами-партнерами, яку класифікують за стандартами НАТО.

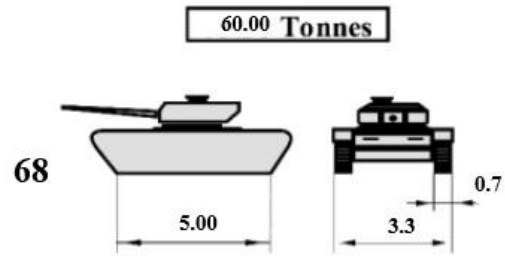


Рис. 9. Геометричні та вагові характеристики гіпотетичного транспортного засобу MLC 68

Fig. 9. Geometric and weight characteristics of the MLC 68 hy-potential vehicle

Для проведення аналізу на міцність переправи елементів наплавного мосту НЖМ–56 створимо модель руслової частини автодорожнього наплавного мосту в комплексі ЛІРА (рис. 10).

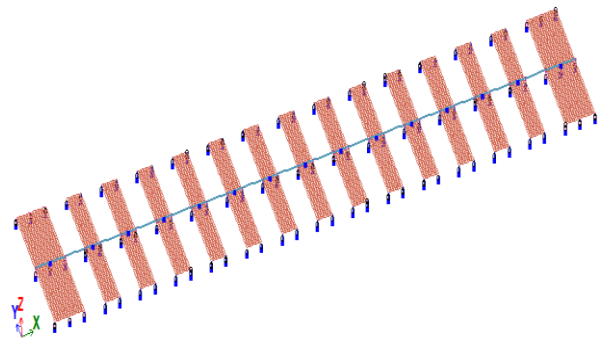


Рис. 10. Модель руслової частини наплавного мосту НЖМ–56

Fig. 10. Model of the channel part of the NZhM-56 pontoon bridge

Модель наплавного мосту довжиною 106,25 м відповідно до технічної документації [8] становлять 4 двотаврові балки № 36, що виготовлені зі сталі М16С автодорожнього проїзду, представлені нерозрізною системою та задані стрижнями однією лінією вздовж мосту. Приєднання балок виконано стрижнями в місцях згідно з технічною документацією [8]. Прикріплення виконує тільки функцію передачі навантаження та має велику жорсткість 1 000 ГПа із поперечним розміром 10×10 см (рис. 11).

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

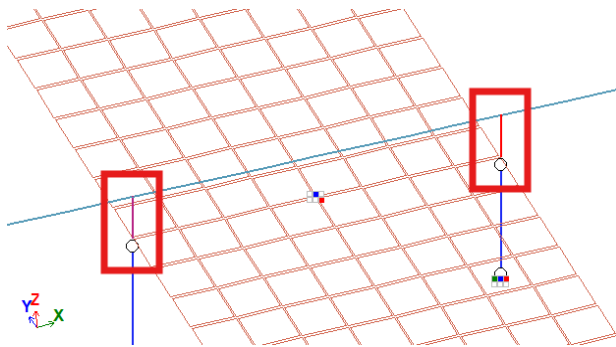


Рис. 11. Прикріплення балок до понтонів

Fig. 11. Attaching beams to pontoons

Понтонна опора складається з кормових і середніх секцій. Секції виконано з пластинчастих елементів висотою 135 см. Модуль деформації перерізу призначено як для сталі, що не враховує порожній простір всередині них. У такому випадку жорсткість понтонів завищена, але дозволяє в деякій мірі компенсувати завищене продавлювання в зоні прикріплення балок через те, що фактично 4 балки прогонової будови розподілені в перерізі мосту рівномірно та не передають тиск в одну й ту саму точку.

Виконано закріплення кожної секції понтонної опори в їхніх центрах уздовж осі  $Y$  мосту та додатково заборонене переміщення вздовж осі  $X$  у центральній понтонній опорі мосту (рис. 12). Це дозволяє стабілізувати модель для коректного завершення розрахунку.

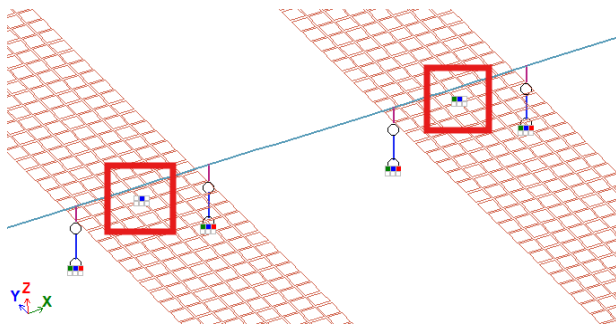


Рис. 12. Просторове закріплення понтонних опор мосту

Fig. 12. Spatial anchoring of the bridge piers

Імітацію плавучості понтонних опор підтверджено та реалізовано за допомогою спірання на стрижні (рис. 13). Перевірку моделі виконано на основі порівняння результатів осідання під час натурних випробувань однієї понтонної опори

згідно з технічною документацією [8] із моделлю ЛІРА. Осідання середньої секції понтонної опори за технічною документацією становить 16 см, за результатами моделі ЛІРА було отримано результат 15,8 см. Відхилення складає 1,25 % та повністю збігається з результатом у 15,8 см (рис. 14), отриманим у дослідженні [7].

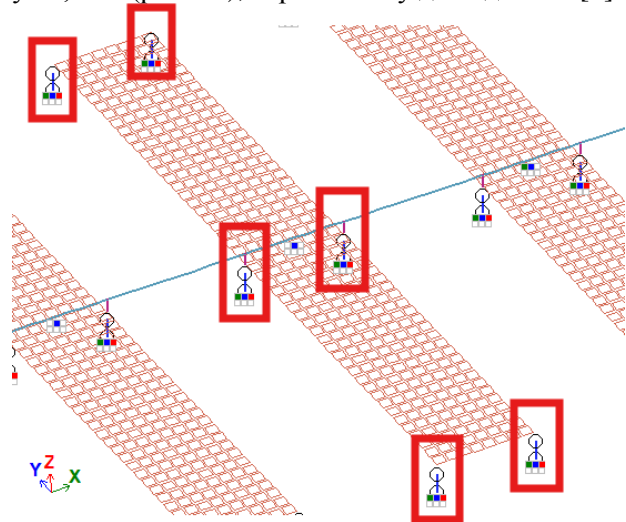


Рис. 13. Прикріплення понтонів до стрижнів, що імітують плавучість моделі

Fig. 13. Attaching pontoons to rods that simulate model buoyancy

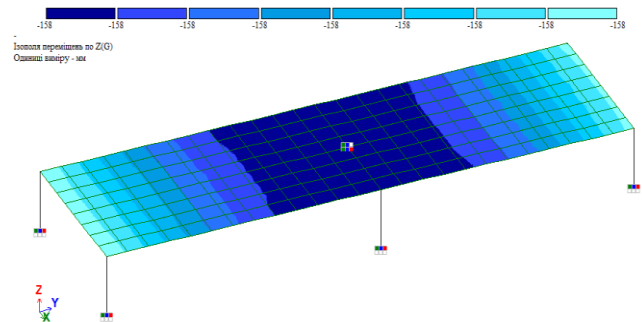


Рис. 14. Результати осідання середньої секції понтонної опори

Fig. 14. Settlement results of the middle section of the pontoon support

Ключовими факторами в налаштуванні правильної роботи стрижнів, що імітують плавучість опор, виступають висота стрижня, модуль пружності та розмір поперечного перерізу. Висота стрижнів становить 1 м. Модуль пружності стрижня  $E_b$  розраховуємо за формулою:

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

$$E_b = \frac{S \times \gamma_w}{n_w}, \quad (1)$$

де  $S$  – площа контакту понтонної опори з водою;  $\gamma_w$  – питома густина води;  $n_w$  – кількість заданих стрижнів. Кількість заданих стрижнів має бути такою, щоб якнайкраще відобразити суцільність контакту грані з водою: для квадратної чи прямокутної площини контакту мінімальна кількість стрижнів має становити не менше 4. У нашому випадку взято 6 і 9 стрижнів для двосекційної понтонної опори та двосекційної здвоєної понтонної опори відповідно з метою уникнення прогину від навантаження в середині опори. Оскільки модуль пружності для стрижнів розраховують на  $1 \text{ м}^2$ , то поперечний переріз взято відповідно  $100 \times 100 \text{ см}$ , отже, модуль пружності стрижнів становитиме 76,52 та 102 кПа для двосекційної понтонної опори та двосекційної здвоєної понтонної опори відповідно. Граничні умови стрижнів установлені таким чином, щоб вони могли вільно обертатись у точках закріплення, для чого додано шарніри, водночас для нижніх кінців стрижнів заборонено переміщення за всіма осями.

Для отримання результатів ліній впливу було досліджено топологію руху одиничного навантаження по точках стрижнів балок (рис. 15). До постійних навантажень було віднесено та задано: для балок прогонових будов – 1,874 кН/м; для кормових секцій понтонної опори – 1,718 кПа; для середніх секцій понтонної опори – 1,551 кПа.

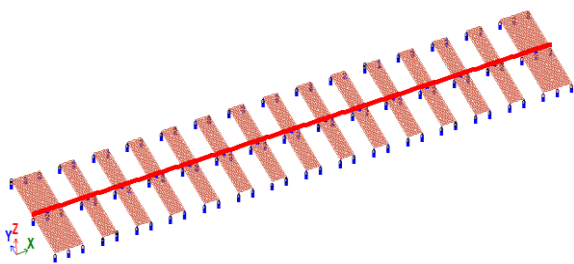


Рис. 15. Топологія руху одиничного навантаження

Fig. 15. Topology of unit load movement

Для дослідження вантажопідйомності елементів мосту було використано схему тимчасового навантаження за моделлю MLC 60 та MLC 70 згідно з [12] MLC 68 як модель гіпотетичного вітчизняного гусеничного транспортного засобу, як результат перерахунку моделі НГ–60 за методикою [12].

Для отримання результатів розрахунку в ЛПРА та подальшого їх обчислення в Mathcad основну увагу було зосереджено на трьох елементах у балках перевірки перерізів із:

- найбільшим згинальним моментом в прогонах між понтонними опорами (результати позовжніх зусиль відсутні);
- найбільшим згинальним моментом на ділянках над понтонними опорами та позовжньою силою при ньому;
- найбільшим позовжнім зусиллям на ділянках над понтонними опорами та згинальним моментом при ньому.

Найбільш навантажені елементи виявились на ділянках передостанніх опор (№ 2, № 14) (рис. 16).

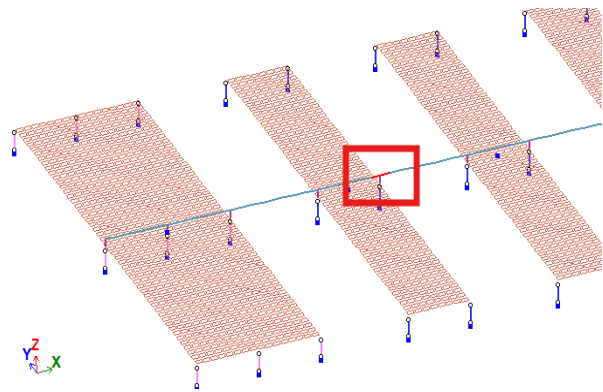


Рис. 16. Положення найбільш навантажених елементів балок прогонової будови

Fig. 16. Position of the most loaded elements of the girder beams of the span structure

Для подальшого визначення напружень було експортовано отримані результати ліній впливу (рис. 17) та імпортовано в програму Mathcad із подальшим розрахунком.

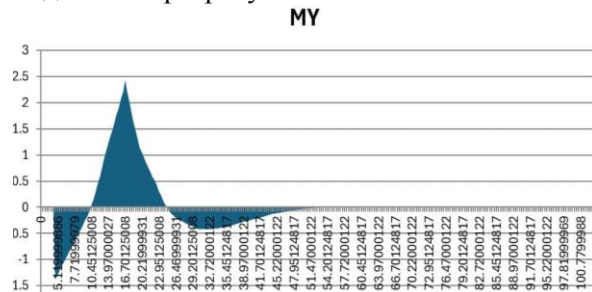


Рис. 17. Лінія впливу максимального згинального моменту в прогонах між понтонними опорами

Fig. 17. The line of influence of the maximum bending moment in the spans between pontoon supports

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

За правилами завантаження ліній впливу, постійні навантаження помножують на площі ділянок які дають найбільше значення зусиль. Під час цього розрахунку було допущено декілька спрощень:

– тимчасове навантаження встановлюють суворо посередині над максимальною ординатою. Якщо навантаження в цьому випадку виступає за межі розрахункової моделі, то його зміщують так, щоб воно повністю стало на модель;

– власну вагу понтонів вважають розподіленою на повну довжину мосту, тобто лінію впливу.

Враховуючи те, що всі навантаження є рівномірно розподіленими, визначення зусиль виконуємо за формулою (2):

$$S = q \times \omega, \quad (2)$$

де  $q$  – значення розподіленого навантаження;  $\omega$  – площа ділянки лінії впливу під розподіленим навантаженням.

Отримані значення за розрахунками зведені до табл. 1.

Таблиця 1

## Значення внутрішніх зусиль

Table 1

## Value of internal efforts

№	Параметр	Значення
1	Розподілене навантаження від транспорту на ділянку навантаження [кН/м]	1 17,72
2	Зусилля максимального згинального моменту в прогонах між понтонами [кН·м]	1 096,104
3	Зусилля максимального згинального моменту над понтонами [кН·м]	601,30
4	Зусилля поздовжньої сили за максимального згинального моменту над понтонами [кН]	–1 753,68
5	Зусилля максимальної поздовжньої сили над понтонами [кН]	–1 839,34
6	Зусилля згинального моменту за максимальної поздовжньої сили над понтонами [кН·м]	501,08

## Продовження таблиці 1

## Continuation of Table 1

№	Параметр	Значення
<b>Визначення зусиль від власної ваги конструкції мосту</b>		
7	Розподілена вага понтонів на міст [кН/м]	12,32
8	Максимальне напруження в прогонах між понтонами за максимального моменту [МПа]	398,09
9	Максимальне напруження над понтонами за максимального моменту [МПа]	307,06
10	Максимальне напруження над понтонами за максимальної поздовжньої сили [МПа]	222,32

Порівняння результатів розрахованих напружень у балках автомобільної прогонової будови зведено до табл. 2.

Таблиця 2

## Значення напружень у балках та вертикальних осідань мосту

Table 2

## Values of stresses in beams and vertical settlements of the bridge

Ділянка завантаження	MLC60	MLC68 (HG–60)	MLC70
За максимального згинального моменту в прогоні між понтонами [МПа]	377,40	398,09	429,65
За максимального згинального моменту на ділянці над понтонами [МПа]	292,78	307,06	331,12
За максимального поздовжнього зусилля на ділянці над понтонами [МПа]	205,67	222,32	241,23
Максимальне вертикальне осідання мосту [м]	0,62	0,69	0,75

### Наукова новизна та практична значимість

Проведено моделювання елементів понтонного мосту, який використовують для подолання водних перешкод у ході відсічі збройної агресії РФ. Отримана модель дозволяє дослідити його роботу під дією сучасного навантаження та встановити можливість його пропуску, а також за потреби виконати оптимізацію та модернізацію конструкції.

Модель може бути використана під час виконання завдань з логістичного забезпечення та технічного прикриття об'єктів інфраструктури. Перерахунок нормативного гусеничного навантаження за стандартами країн НАТО дозволяє адаптувати його до сучасної класифікації за навантаженням.

### Висновки

Проаналізовано застосування наявної понтонної системи мосту, досліджено військову класифікацію транспортних засобів країн НАТО, створено модель понтонного мосту та досліджено його роботу під дією сучасного навантаження. За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Застосування понтонних систем мостів в умовах сьогодення в ході відсічі збройної агресії РФ відіграє значну роль для підтримання логістичного забезпечення та технічного прикриття об'єктів інфраструктури.

2. Для застосування наданих іноземними партнерами засобів із подолання водних перешкод необхідно використовувати сучасну класифікацію країн НАТО за вантажопідйомністю військових транспортних засобів.

3. Отримане значення MLC моделі нормативного вітчизняного гусеничного навантаження дозволяє адаптувати його до подолання водних перешкод за допомогою сучасних засобів.

4. Визначення напружено-деформованого стану конструкції за допомогою використання сучасних інструментів дозволяє оцінити її несну здатність з урахуванням вимог із пропуску сучасного навантаження.

5. Аналіз отриманих значень напружень у балках прогонової будови та максимальних вертикальних осідань мосту, що є обмежувальними характеристиками несної здатності конструкції, дозволяє надати рекомендації щодо пропуску необхідного навантаження, а також визначити подальші напрями для дослідження системи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Браун С. Як понтони можуть допомогти Україні обійти мінні поля, окопи та танкові пастки. *Kyiv Post. Ukraine's global voice*. 2023. URL: <https://www.kyivpost.com/uk/analysis/20652>
2. Гернич М. В., Ключник С. В. Використання майна наплавного мосту НЖМ–56 зважаючи на виклики військового сьогодення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 22. С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268185>
3. Гернич М. В., Ключник С. В. Сталезалізобетонні прогонові будови мостів для постконфліктного відновлення зруйнованої транспортної інфраструктури. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2021. № 19. С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233872>
4. Горбатюк Ю. М., Ярмолюк В. М., Артем'єв М. С. (2014) Застосування наплавних мостів на сучасному етапі будівництва Збройних Сил України. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2014. № 5. С. 29–34. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2014/40389>
5. *ДБН В.1.2-15:2009 (2009). Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи* [Чинний від 01-03-2010]. Київ : Мінрегіонбуд України, 83 с.
6. Козацький С. ДССТ відновлює зруйнований залізничний міст на дільниці Київ – Коростень. *Militaryni*. 2022. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/dsst-vidnovlyuye-zrujnovanyj-zaliznychnyj-mist-na-dilnytsi-kyyiv-korosten/>
7. Перепелиця К. М., Ключник С. В. Використання наплавних (понтонних) мостів для технічного прикриття транспортних об'єктів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. № 26. С. 63–70. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315301>
8. Телов В. И., Коблов И. Т., Тараканов И. Н., Новиков Г. И. *Наплавной железнодорожный мост НЖМ56*. Главное управление железнодорожных войск, 1977. 344 с.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

9. Українські військові навели понтонну переправу на Курському напрямку. *АрміяInform*. 2025. URL: <https://armyinform.com.ua/2025/03/21/ukrayinski-vijskovi-navely-pontonnu-perepravu-na-kurskomu-napryamku/>
10. Chmielewski R., Piechota M., Bawiec B. Emergency use of a floating bridge within a large urban conurbation. *Engineering Expert*. 2020. No. 11. P. 24–34. DOI: <https://doi.org/10.37105/enex.2020.1.1.04>
11. Hornbeck B., Kluck J., Connor R. Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment. *Defense Technical Information Center*. 2005.
12. *Military Load Classification of Bridges, Ferries, Rafts and Vehicles* (STANAG 2021 Ed. 8 / AEP-3.12.1.5). Brussels : NATO Standardization Office, 2017. 6 p.

K. M. PEREPELYTSIA<sup>1\*</sup>, S. V. KLIUCHNYK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. of Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 738 54 25, e-mail [kirill\\_perepelitsa@ukr.net](mailto:kirill_perepelitsa@ukr.net), ORCID 0009-0006-4454-7237

<sup>2</sup>Dep. «Transport infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail [ssser05@ukr.net](mailto:ssser05@ukr.net), ORCID 0000-0001-7771-8377

## Research of pontoon bridge elements in view of modern challenges in terms of load capacity

**Purpose.** The main purpose of this work is to study the current requirements for floating means for overcoming water obstacles; adaptation of the normative tracked load to the standard of dynamic effects of tracked and wheeled military loads of NATO countries; modeling of the elements of the pontoon bridge NZhM-56 using software to study it under the influence of modern load; study of the stress-strain state of the bridge elements to determine its carrying capacity. **Methodology.** The paper analyzes the current load capacity requirements for pontoon systems, taking into account the challenges of today, using the experience of NATO countries in the military classification of the load capacity of artificial structures. The internal forces in the elements of a pontoon bridge under the influence of a modern moving load are determined by the method of lines of influence. Software that implements the finite element method was used to study the pontoon bridge. **Findings.** The requirements of the modern NATO standard for military loads were investigated. An adaptive recalculation of the tracked load model, for which the structure was designed, was carried out to meet the NATO military load standard. The results of internal forces in the beams of the bridge span structure were obtained. **Originality.** The elements of the model of a pontoon bridge used to overcome water obstacles during the repulsion of the armed aggression of the Russian Federation were reproduced using software that allows to study the operation of the pontoon system (available resource) and to establish the real load capacity of the bridge, taking into account the requirements of the NATO standard for loading. The domestic tracked load was adapted to the requirements of NATO countries according to the classification of military vehicles. **Practical value.** Determination of the load capacity of pontoon bridge elements will allow rational use of the available resource, passage of modern loads in accordance with the challenges of today, as well as optimization and modernization of bridge structures. Determining the compliance of the domestic load classification with the requirements of NATO countries helps to ensure the passage of existing equipment through artificial structures classified according to modern standards.

**Keywords:** pontoon bridges; load capacity; overcoming water obstacles; functioning of transport infrastructure; Military Load Classification (MLC); method of influence lines; modeling of pontoon systems; finite element method

### REFERENCES

1. Braun, S. (2023). Yak pontony mozhut dopomohty Ukraini obiity minni polia, okopy ta tankovi pastky. *Kyiv Post Ukraine's global voice*. Retrieved from <https://www.kyivpost.com/uk/analysis/20652> (in Ukrainian)
2. Hernich, M. V., & Kliuchnyk, S. V. (2022). Use of property of floating bridge nzhm-56 considering today's military challenges. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 22, 27-32. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268185> (in Ukrainian)
3. Hernich, M., Klutchnik, S., & Spivak, D. (2021). Composite reinforced concrete bridge girders for post-conflict reconstruction of the destroyed transport infrastructure. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 19, 28-37. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233872> (in Ukrainian)

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. Gorbatyuk, Y. M., Yarmolyuk, V. M., & Artemyev, M. S. (2014). Application of floating bridges at the present stage of the armed forces of Ukraine. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 5, 29-34. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2014/40389> (in Ukrainian)
5. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy*, 83 DBN V.1.2-15:2009. (2009). Kyiv: Minregionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
6. Kozatskyi, S. (2022). DSST vidnovliuie zruinovanyi zaliznychnyi mist na dilnytsi Kyiv-Korosten. *Militarnyi*. Retrieved from <https://mil.in.ua/uk/news/dsst-vidnovlyuye-zruinovanyj-zaliznychnyj-mist-na-dilnytsi-kyiv-korosten/> (in Ukrainian)
7. Perepelytsia, K. M., & Kliuchnyk, S. V. (2024). Use of floating (pontoon) bridges for the engineering cover of transport facilities. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 26, 63-70. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315301> (in Ukrainian)
8. Telov, V. I., Koblov, I. T., Tarakanov, I. N., & Novikov, G. I. (1977). *Naplavnoy zheleznodorozhnyy most NZhM56*. Glavnoe upravlenie zheleznodorozhnykh voysk. (in Russian)
9. Ukrainski viiskovi navely pontonnu perepravu na Kurskomu napriamku. (2025). *ArmijaInform*. Retrieved from <https://armyinform.com.ua/2025/03/21/ukrayinski-vijskovi-navely-pontonnu-perepravu-na-kurskomu-napryamku/> (in Ukrainian)
10. Chmielewski, R., Piechota, M., & Bawiec, B. (2020). Emergency use of a floating bridge within a large urban conurbation. *Engineering Expert*, 1, 24-34. DOI: <https://doi.org/10.37105/enex.2020.1.1.04> (in English)
11. Hornbeck, B., Kluck, J., & Connor, R. (2005). Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment. *Defense Technical Information Center*. DOI: <https://doi.org/10.21236/ada476104>
12. *Military load classification of bridges, ferries, rafts and vehicles* (STANAG 2021 Ed. 8 / AEP-3.12.1.5). (2017). NATO Standardization Office. (in English)

Надійшла до редколегії: 27.02.2025

Прийнята до друку: 25.06.2025

## УДК 625.42:[623.746:614.8]

О. Л. ТЮТЬКІН<sup>1\*</sup>, Д. О. БОСИЙ<sup>2</sup>, О. І. САБЛІН<sup>3</sup>, Н. К. БОНДАРЕНКО<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>2</sup>Каф. «Інтелектуальні системи енергопостачання», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 25, ел. пошта d.o.bosyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1818-2490

<sup>3</sup>Каф. «Екологічна та цивільна безпека», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 13 03, ел. пошта o.i.sablin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

<sup>4</sup>Геотехнічна лабораторія, Isotop Ltd., вул. Ярок, 20, Гедера, Ізраїль, 7075001, тел. 04-8618000, ел. пошта tasha.zirka@gmail.com, ORCID 0000-0003-0804-7500

## Оцінка вибухового впливу та методика виявлення безпілотних літальних апаратів для захисту вестибюлю метрополітену

**Мета.** Автори ставлять за мету визначити основи оцінки вибухового впливу баражуючих боеприпасів на конструкцію вестибюлю метрополітену та розробити методику виявлення безпілотних літальних апаратів (БпЛА) на базі інформаційних технологій. **Методика.** У статті проаналізовано два ймовірні сценарії, що характеризують стратегію масованої атаки БпЛА. Відзначено, що слід розглядати ці сценарії не у відриві один від одного, а в комплексі, вважаючи, що ймовірність негативного сценарію дуже висока, навіть у разі успішної реалізації позитивного. Розглянуто найпоширенішу конструкцію підземного вестибюлю (трипрогонова рама з двома рядами колон). Наведено, що важливою інформативною ознакою БпЛА під час польоту є акустичне випромінювання, яке дозволяє виявляти ці апарати в умовах, коли оптичні та радіолокаційні засоби не забезпечують необхідної точності. Розроблено скінченноелементну модель вестибюлю метрополітену на основі реальних геометричних розмірів за допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD. **Результати.** Для розв'язання першої задачі (негативний сценарій) проведено оцінку міцності вестибюлю метрополітену. Аналіз деформованого стану свідчить про нормальний розподіл усіх компонентів. Визначено, що еквівалентні напруження не досягають розрахункового опору для бетону C25/30, а запаси міцності в середньому становлять 1,7...4,6 рази, тобто запроєктована конструкція витримує комбіноване навантаження від власної ваги та вибухового навантаження. Для розв'язання другої задачі (позитивний сценарій) запропоновано концептуальну схему моніторингу стану об'єктів наземної критичної інфраструктури в зоні закладення вестибюлю метрополітену з інтеграцією в систему виявлення загроз із повітря. **Наукова новизна.** У статті вперше проведено оцінку вибухового впливу від баражуючого боеприпасу на конструкцію вестибюлю метрополітену. На основі цієї оцінки визначено міцність залізобетонної конструкції вестибюлю як потенційного укриття. **Практична значимість.** Розроблено методику виявлення на базі інформаційних технологій безпілотних літальних апаратів для захисту вестибюлю метрополітену.

**Ключові слова:** метрополітен; вестибюль; безпілотний літальний апарат (БпЛА); акустичне випромінювання; оцінка міцності; захист укриття; критична інфраструктура

### Вступ

Протягом війни російської федерації проти України задокументовано низку випадків, які є воєнними злочинами та характеризують агресивну практику країни-агресора як терористичну. Свідоме застосування масованих атак баражуючих боеприпасів «Шахед–131» («Герань–1») та «Шахед–136» («Герань–2») є однією з основних тактик залякування мирного населення, оскільки потрапляння таких дронів-камікадзе, тобто безпілотних літальних

апаратів (БпЛА), найчастіше усього розраховано на дрібні руйнування об'єктів критичної інфраструктури та житлового фонду, а також на вбивство українських громадян [1].

Проте не слід відкидати можливість зміни терористичної стратегії російської федерації, під час якої масована атака дронів-камікадзе може бути спрямована виключно на мирне населення з метою геноциду [11], як це спостерігалось під час цинічно завданого бомбового удару 16 березня 2022 року по Маріупольському драматичному театрові, перед яким було

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

нанесено напис-застереження «ДІТИ», або ракетного удару 8 липня 2024 року по дитячій лікарні «Охматдит» у Києві. Безсумнівно, зважаючи на масу бойової частини (15 і 45 кілограмів БпЛА «Шахед–131» і «Шахед–136» відповідно), для масованих атак баражуючими боеприпасами можуть бути обрані лише невеликі об'єкти, зокрема й укриття. Зміна терористичної стратегії рф досить вірогідна, зважаючи на частотність появи характерних випадків у Херсонському та Миколаївському регіонах, у яких терористичним атакам малих БпЛА (FPV-дрони зі скидом та камікадзе) були піддані автобуси, зупинки та поодинокі пішоходи.

Важливим видом укриття є об'єкти метрополітену, які під час війни більш явно проявляють своє подвійне призначення [10]. На відміну від залізобетонних міських укриттів, об'єкти метрополітену, зокрема станції глибокого та мілкого закладень, підземні переходи та вестибюлі мають значний простір і, відповідно, велику місткість [8, 9]. Широко відомо, що протягом війни об'єкти Київського, Харківського і Дніпровського метрополітенів надають захист тисячам містян, які під час ракетно-бомбових ударів можуть перебувати в цих підземних укриттях тривалий час. Відповідно, в разі зміни терористичної стратегії російської федерації можливі також і масовані атаки БпЛА на ці об'єкти, коли в них буде спостерігатися значне скупчення людей. У цьому випадку найбільш вразливими для терористичних дій, пов'язаних із застосуванням вибухових пристроїв, є саме вестибюлі і певною мірою станції метрополітену мілкого закладення (5...10 м від денної поверхні).

Для розв'язання задачі захисту вестибюлів метрополітену слід розглянути два ймовірні сценарії, що характеризують стратегію масованої атаки баражуючими боеприпасами. Причому слід розглядати ці сценарії не у відриві один від одного, а в комплексі, зважаючи, що ймовірність негативного сценарію дуже висока навіть у разі успішної реалізації позитивного. Саме наявність цих двох сценаріїв є підґрунтям того, що вказана наукова задача повинна бути комплексною і потребує двох напрямів її вирішення, що є пов'язаними між собою.

Негативний сценарій впливу БпЛА на конструкцію вестибюлю моделює падіння баражу-

ючих боеприпасів «Шахед–131» («Герань–1») та «Шахед–136» («Герань–2») поблизу об'єкта з подальшим вибухом і впливом вибухової дії на підземний об'єкт. Відповідно, задачею, що впливає з цього сценарію, є оцінка впливу вибуху на сукупну систему, що складається з дорожнього покриття, зворотної засипки та конструкції вестибюлю метрополітену. Метою цієї оцінки є з'ясування міцності вказаної конструкції.

Позитивний сценарій впливу БпЛА реалізує зменшення ймовірності його потрапляння в зону закладення вестибюлю метрополітену. Відповідно, реалізація цього сценарію полягає у виявленні баражуючих боеприпасів на підльоті до укриття з подальшим запровадженням комплексу заходів радіоелектронної боротьби або фізичного знищення БпЛА.

Не викликає сумнівів, що саме інформаційні технології [2] є найефективнішими для виявлення БпЛА [3] під час захисту укриття, яким є вестибюль станції метрополітену. Важливою інформативною ознакою БпЛА під час польоту є акустичне випромінювання, яке дозволяє виявляти їх в умовах, коли оптичні та радіолокаційні засоби не забезпечують необхідної точності [4, 5]. Акустичні хвилі, які генерують БпЛА, поширюються в просторі, і їх можуть фіксувати акустичні приймачі сигналу (мікрофони), що перетворюють акустичний тиск на електричний сигнал.

Джерелами звукових хвиль БпЛА є рухомі установки і лопаті повітряних гвинтів, частота генерованого звуку яких кратна частоті обертання колінчастого вала поршневого двигуна, кількості та частоті обертання лопатей повітряного гвинта, а інтенсивність звуку залежить від швидкості обтікання лопатей повітрям.

Для завчасного виявлення БпЛА необхідна система розподілених високочутливих акустичних приймачів, які на достатній дальності здатні з високим ступенем точності зафіксувати факт наближення літаючого апарату за його акустичним портретом, визначити його тип, напрям, швидкість і передати інформацію за призначенням [2]. Система повинна бути простою, дешевою, надійною, мати незалежне енергоживлення та можливість інтегруватися до системи оповіщення більш високого рівня.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Слід ще раз підкреслити, що розв’язання задачі захисту вестибюлю на основі негативного й позитивного сценаріїв є комплексним, оскільки навіть за 90 % ймовірності реалізації методики завчасного виявлення БПЛА залишається вірогідність вибухового впливу, який повинен бути оцінений. Також треба відзначити, що з підвищенням кількості масованих атак та числа баражуючих боєприпасів, які застосовують одночасно, ймовірність негативного сценарію зростає.

**Мета**

Основною метою цієї статті є запровадження основ оцінки вибухового впливу безпілотних літальних апаратів на конструкцію вестибюлю метрополітену та розробка методики виявлення баражуючих боєприпасів на базі інформаційних технологій.

**Методика**

Найпоширенішою конструкцією підземного вестибюлю з огороженням «стіною в ґрунті» є трипрогонова рама з двома рядами колон, виконана зі збірного залізобетону (рис. 1).

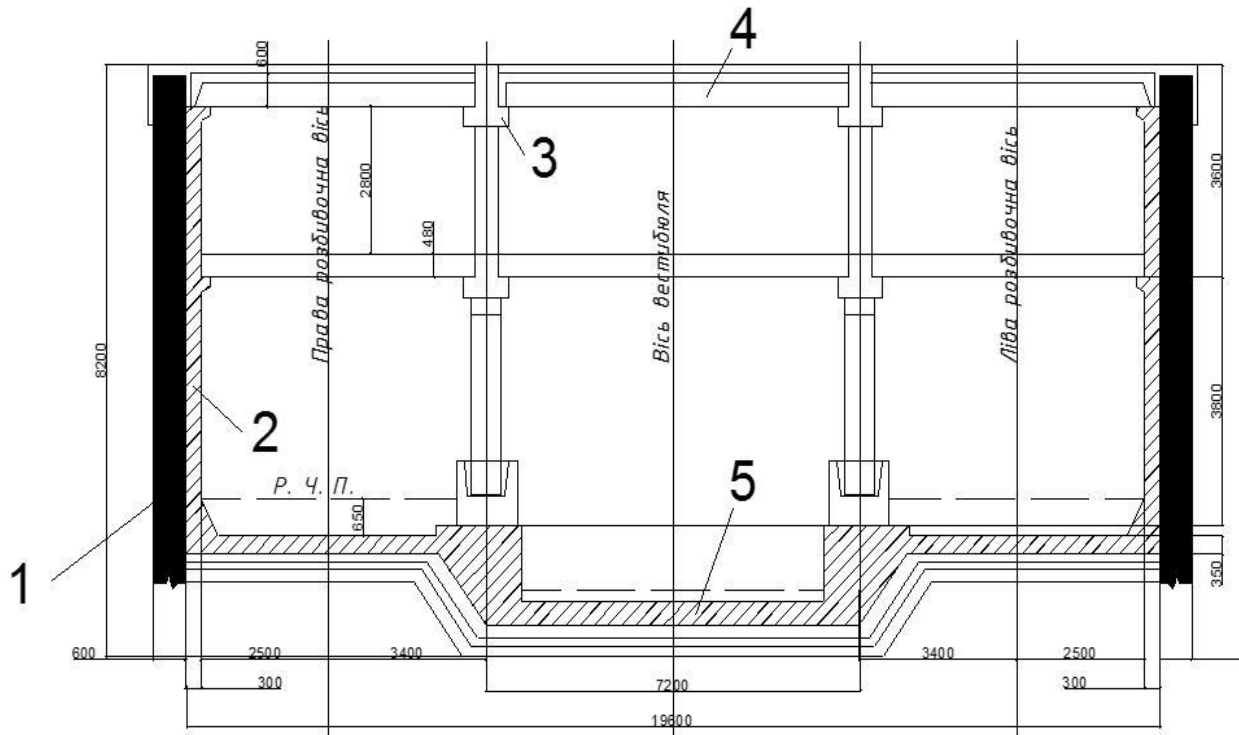


Рис. 1. Конструкція підземного вестибюлю станції мілкового закладення:

- 1 – «стіна в ґрунті»;  
 2 – несна стінка з ригелем для кріплення перекриття;  
 3 – прогін; 4 – перекриття;  
 5 – лоткова частина з монолітного бетону

Fig. 1. The structure of the underground vestibule of the shallow station:

- 1 – slurry wall;  
 2 – load-bearing wall with a crossbar for lining the floor;  
 3 – span; 4 – floor;  
 5 – tray part made of monolithic concrete

Особливістю конструкції вестибюлю є те, що на колони 4 спирається двоконсольний прогін 2, на якому розміщено ребристі плити верхнього перекриття середнього 3 і крайніх 1 про-

гонів. Плити крайніх прогонів спираються з другого боку на стінні блоки 5. Відстань між осями колон у поперечному перерізі вестибюлю призначають для потреби пропуску поїздів,

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тобто з урахуванням габариту наближення будівель станції метрополітену мілкого закладення. За цих умов визначають висоту підлоги вестибюлю від рівня головки рейки. Таким чином, мінімальна висота сходового маршу з урахуванням товщини перекриття складає 3,12 м [6].

Робота акустичної системи ідентифікації для підземного вестибюлю станції метрополітену мілкого закладення здійснюється таким чином. Масив значень акустичних сигналів, отриманий шляхом накопичення даних, які передають через мережу, побудовану за стільниковою топологією з використанням пристроїв вимірювання шуму з бездротовою передачею даних, надходить до блоку декодування. Ці пристрої розташовані вздовж захищеної зони та додатково під'єднані до інших інфраструктурних об'єктів для впровадження системи технічної діагностики. Система аналізує отриманий масив даних, розраховуючи координати безпілотного літального апарата відносно вестибюлю, щоб активувати сигнал тривоги.

Запропоновано прототип такої системи у вигляді розподілених пристроїв вимірювання технічних параметрів уздовж ділянки, який інтегровано в систему моніторингу, де пристрої вимірювання прискорень суміщені з пристроями вимірювання шуму та, за рахунок бездротової передачі даних, дозволяє виконувати просторовий аналіз та акустичну ідентифікацію повітряних загроз уздовж ділянки.

Алгоритм роботи системи акустичної ідентифікації такий. На вхід через блок декодування надходить масив значень акустичного сигналу, отриманий шляхом накопичення даних, які передають мережею, що побудована за комірковою топологією пристроями вимірювання шуму з бездротовою передачею даних, розподілених уздовж захищеної зони та під'єднаних додатково до інших інфраструктурних об'єктів для реалізації системи технічного діагностування. Система виконує аналіз отриманого масиву даних шляхом пошуку розрахункової координати БпЛА відносно об'єкта захисту для спрацювання оповіщення.

Для впровадження запропонованого методу потрібно розробити спеціальний пристрій ви-

мірювання акустичного сигналу та інших цифрових параметрів з бездротовою передачею даних [2]. Розроблений пристрій направлений на підвищення безпеки містян, які перебувають в укритті (наприклад, вестибюлі метрополітену), та підвищення точності ідентифікації загроз в акустичному сигналі.

Принцип роботи пристрою полягає в тому, що для вимірювання шуму застосовують цифровий мікрофон, до виходу якого під'єднаний пристрій узгодження та мікроконтролер загального призначення з вбудованим багатоканальним аналогово-цифровим перетворювачем.

Пристрій можна налаштовувати на розрізнення звуків малої інтенсивності в необхідних частотних діапазонах, притаманних акустичним портретам БпЛА, після виділення яких він переходить із «режиму сну» в активний, що забезпечує його енергоекономічність.

Для аналізу міцності конструкції вестибюлю метрополітену розроблено детальну скінченно-елементну модель (СЕ-модель). Для найбільшої точності відтворення реальної взаємодії цієї конструкції розроблено просторову модель за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) на основі об'ємних СЕ. Більш плідним підходом до цієї проблеми можна вважати застосування цього методу в професійному розрахунковому методі, оскільки результатом, одержаним з його допомогою, є ізолінії та ізополя параметрів напружено-деформованого стану, які легко інтерпретувати.

СЕ-модель вестибюлю метрополітену побудована на основі реальних геометричних розмірів за допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD, version 7.31 (SCAD) [6]. Модель основана на об'ємних скінченних елементах (19 491 вузлів, 12 288 скінченних елементів; задача середньої розмірності) і більш повно відображає роботу вестибюлю із довколишнім масивом. Після створення просторової СЕ-моделі їй надано деформаційні характеристики (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона), причому для ґрунту та залізобетону їх задано окремо (рис. 2).

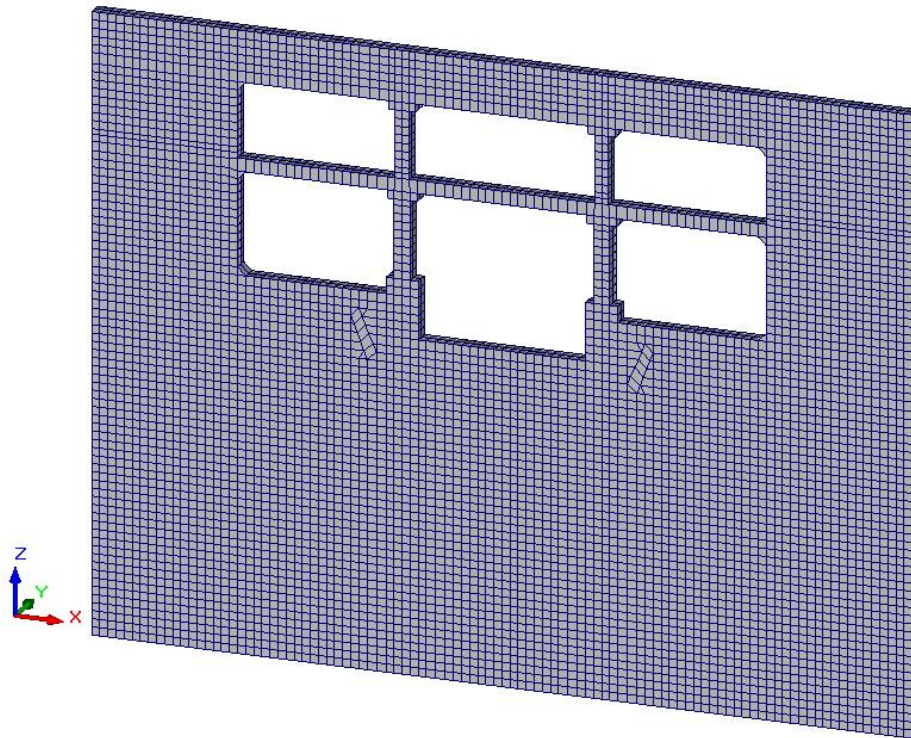


Рис. 2. Загальна SE-модель вестибюлю із «стіною в ґрунті» та довколишнім ґрунтом

Fig. 2. General FE-model of a vestibule with a slurry wall and surrounding soil

Деформаційні характеристики SE-моделі такі: 1) пісок дрібний середньої щільності, насичений водою: модуль пружності  $E = 30$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu = 0,3$ , питома вага  $\gamma = 20,5$  кН/м<sup>3</sup>; 2) пісок дрібний, водонасичений: модуль пружності  $E = 30$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu = 0,25$ , питома вага  $\gamma = 19,5$  кН/м<sup>3</sup>; 3) залізобетон конструкції та «стіни в ґрунті»: приведений модуль пружності  $E = 36 \cdot 10^3$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu = 0,2$ , питома вага  $\gamma = 24,5$  кН/м<sup>3</sup>; 4) бетон основи, товщина шару 0,6 м: модуль пружності  $E = 27 \cdot 10^3$  МПа, коефіцієнт Пуасона  $\mu = 0,2$ , питома вага  $\gamma = 20$  кН/м<sup>3</sup>.

Після надання деформаційних характеристик на модель накладено граничні умови: 1) по нижній межі моделі – заборона по осях  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ; 2) по боках моделі (вздовж боків, які паралельні осі тунелю) – заборона по осях  $X$  та  $Y$ ; 3) по торцях моделі (сторони, які перпендикулярні осі  $X$ ) – заборона по осі  $Y$ .

Після цього виконано розрахунок на власну вагу SE-моделі і вибухове навантаження від баражуючого боєприпасу «Шахед–136»

(«Герань–2»), що прикладене на денній поверхні на однаковій відстані від колон [7, 12].

### Результати

Для розв’язання першої задачі (негативний сценарій) проведено оцінку міцності під час розрахунку вестибюлю метрополітену. Після чисельного аналізу за допомогою Structure CAD отримані загальні результати напружено-деформованого стану конструкції вестибюлю метрополітену проаналізовано. На рис. 3 наведено результати деформованого стану SE-моделі вестибюлю.

Аналіз деформованого стану свідчить про нормальний розподіл обох компонентів, причому їх значення не суперечать роботі вестибюлю: максимальні вертикальні переміщення шелиги середнього залу станційної конструкції становлять 12 мм, лотка – 8 мм.

Наведені дані про деформований стан конструкції є радше ілюстративними, оскільки найбільший інтерес у дослідженні становлять напруження.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

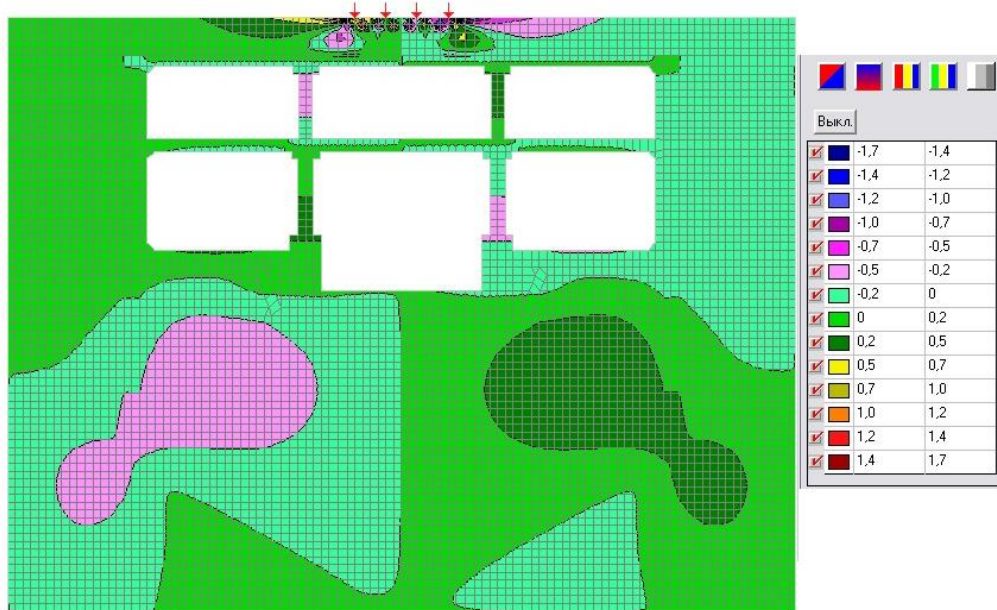
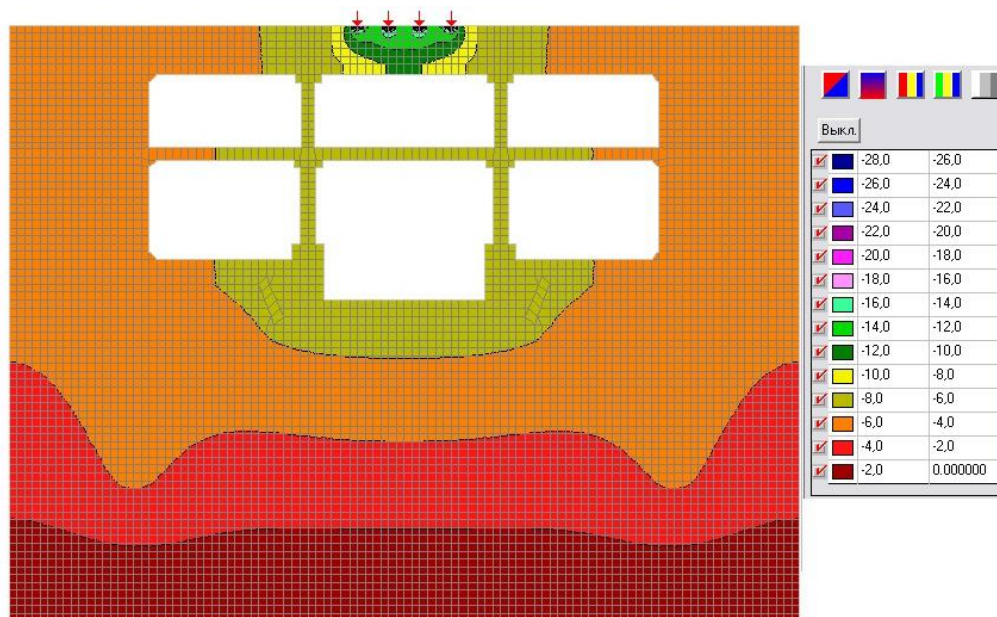
*a – a**б – б*

Рис. 3. Ізополя та ізолінії горизонтальних (*a*) та вертикальних (*б*) переміщень у фрагменті моделі (фрагмент оправи вестибюлю) від вибухового навантаження

Fig. 3. Isofields and isolines of horizontal (*a*) and vertical (*b*) displacements in a fragment of the model (fragment of the vestibule lining) from explosive loading

Для розрахунку на міцність наведено презентаційні дані напруженого стану лише щодо конструкції вестибюлю (рис. 4 і 5). Розподіл напружень у конструкції вестибюлю є стандартним і не суперечить класичним уявленням про розподіл напружень у конструкціях із кутами і

колонами. Для подальшого розрахунку конструкції вестибюлю на міцність, який буде проведено лише щодо бетону, тобто на тріщиностійкість, застосовуємо формулу четвертої теорії міцності (енергетичну), що враховує просторовий розподіл напруженого стану [6].

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

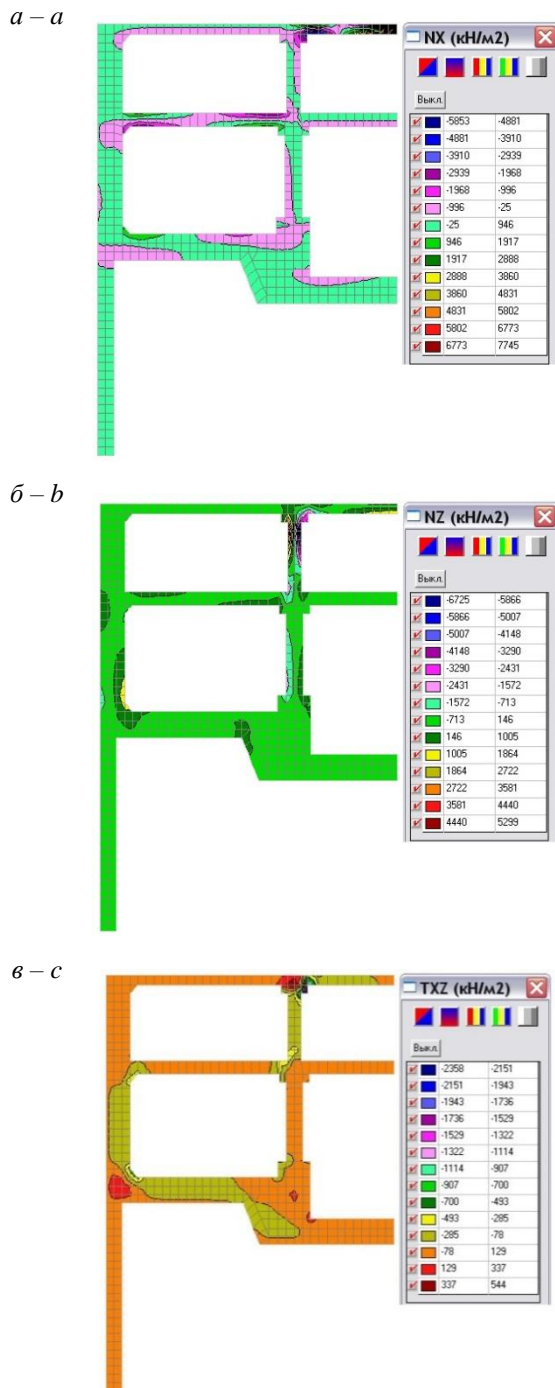


Рис. 4. Ізополя та ізолінії горизонтальних (*a*), вертикальних (*b*) та дотичних (*c*) напружень у фрагменті моделі (фрагмент оправи вестибюлю) від вибухового навантаження

Fig. 4. Isofields and isolines of horizontal (*a*), vertical (*b*) and tangential (*c*) stresses in a fragment of the model (fragment of the vestibule lining) from explosive loading

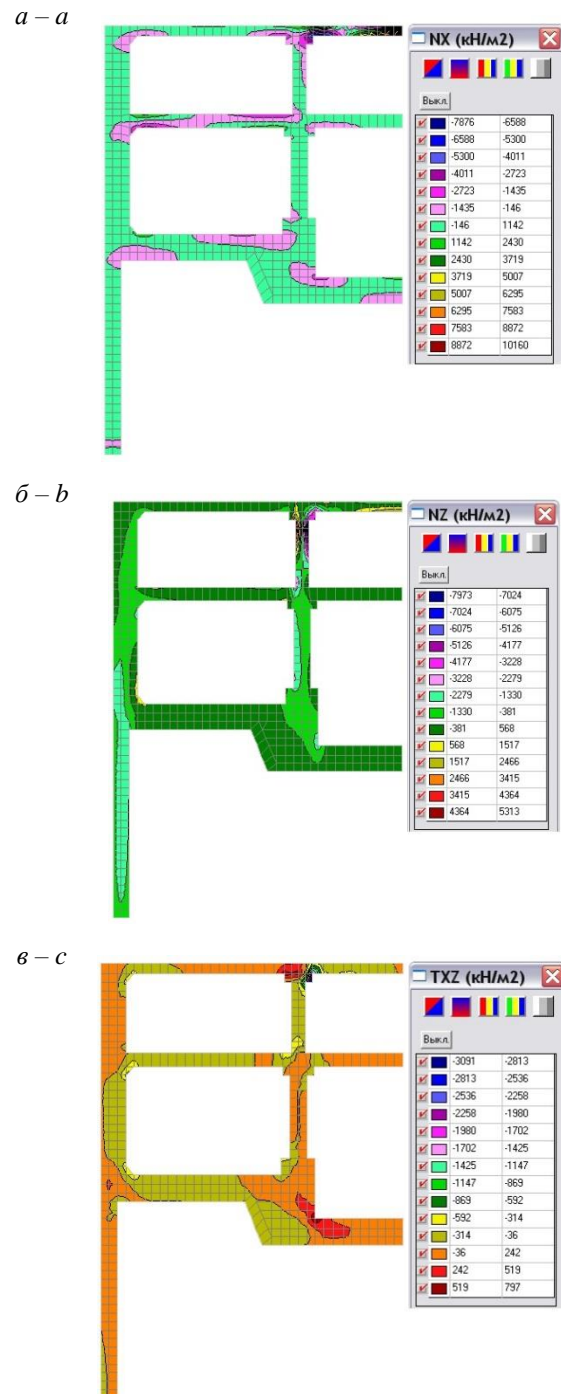


Рис. 5. Ізополя та ізолінії горизонтальних (*a*), вертикальних (*b*) та дотичних (*c*) напружень у фрагменті моделі (фрагмент оправи вестибюлю) від власної ваги та вибухового навантаження

Fig. 5. Isofields and isolines of horizontal (*a*), vertical (*b*) and tangential (*c*) stresses in a fragment of the model (fragment of the vestibule lining) from its own weight and explosive load

Як видно з аналізу рис. 4 і 5, перевірку на міцність слід провести в точках концентрації, які вказані на рис. 6.

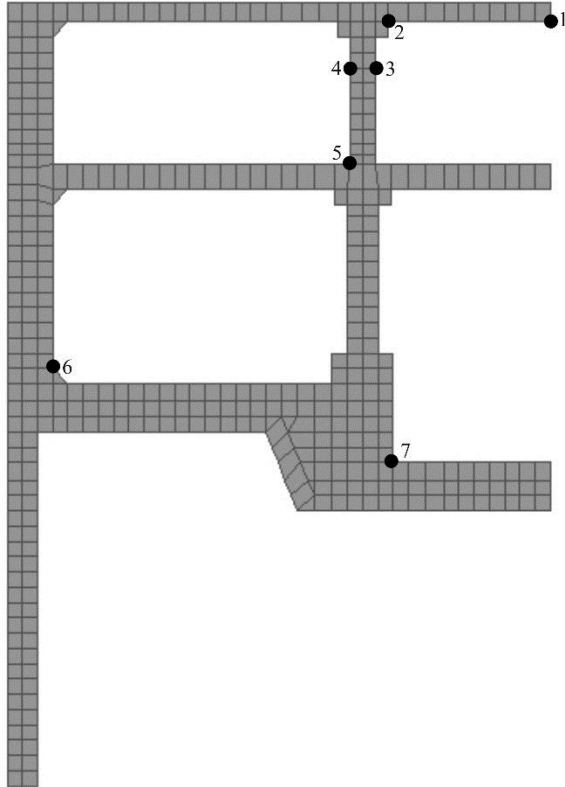


Рис. 6. Точки концентрації напружень у конструкції вестибюлю

Fig. 6. Stress concentration points in the vestibule structure

Отримання еквівалентних напружень дозволяє врахувати складний напружений стан в елементах моделі і більш точно з'ясувати поведінку конструкції в разі взаємодії її з довколишнім масивом та спектром навантажень. Розрахунок за еквівалентними напруженнями для комбінованого навантаження від власної ваги та вибухового навантаження (рис. 5) наведено в табл. 1.

Як бачимо з таблиці, еквівалентні напруження не досягають розрахункового опору для бетону C25/30, а запаси міцності в середньому становлять 1,7...4,6 рази (у точці концентрації 6 – 18,4 рази), тобто можна зробити висновок, що запроєктована конструкція витримує комбіноване навантаження від власної ваги та вибухового навантаження.

Таблиця 1

**Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності**

Table 1

**Calculation of equivalent stresses according to the fourth strength theory**

Номер точки	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа / Коефіцієнт запасу
	Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ	
1	-7,87	+1,52	+0,24	7,24/2,9
2	-7,87	-5,13	-3,09	12,5/1,7
3	-1,44	-7,97	-0,36	8,80/2,4
4	-0,15	+5,31	-0,36	5,27/4,0
5	-2,72	-3,23	-0,59	5,26/4,0
6	-0,15	+0,57	-0,59	1,14/18,4
7	-2,72	-2,28	+0,79	4,55/4,6

Еквівалентні напруження та запас міцності в точці концентрації 2 (12,5 МПа та 1,7 рази) можна вважати задовільними і такими, що не викликають потреби у зміні конструкції.

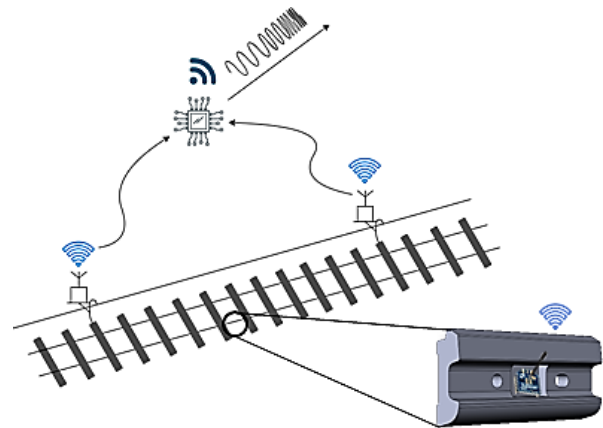


Рис. 7. Концептуальна схема моніторингу стану об'єктів наземної критичної інфраструктури в зоні закладення вестибюлю метрополітену з інтеграцією в систему виявлення загроз із повітря

Fig. 7. Conceptual scheme of monitoring the condition of ground critical infrastructure facilities in the area of the metro vestibule with the integration of an aerial threat detection system

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Для розв'язання другої задачі (позитивний сценарій) на основі досліджених технологій у статті запропоновано концептуальну схему моніторингу стану об'єктів наземної критичної інфраструктури в зоні закладення вестибюлю метрополітену з інтеграцією в систему виявлення загроз із повітря (рис. 7). Ця система використовує дві бездротові технології: ZigBee для збору даних між пристроями на відстані 75...100 метрів та LoRa для передачі критичних, узагальнених даних (на відстань до 10 км), таких як виявлення аномалій.

Система оснащена цифровим мікрофоном, під'єднаним до мікроконтролера, який дозволяє записувати звук, коли рівень акустичного сигналу перевищує заданий поріг. Після завершення запису система аналізує дані за допомогою нейронної мережі, оптимізованої для ресурсів мікроконтролера, щоб оцінити потенційні загрози та активувати миттєвий сигнал тривоги.

#### Наукова новизна та практична значимість

У статті вперше проведено оцінку вибухового впливу від баражуючого боєприпасу «Шахед–136» на конструкцію вестибюлю метрополітену. На основі цієї оцінки визначено міцність залізобетонної конструкції вестибюлю як потенційного укриття, яка свідчить про достатній рівень захисту людей у разі одиничного влучання баражуючого боєприпасу.

Практична значимість дослідження полягає в розробці методики виявлення безпілотних літальних апаратів для захисту вестибюлю метрополітену. Розроблена концептуальна схема моніторингу в зоні закладення вестибюлю з інтеграцією в систему виявлення загроз може бути впроваджена для підвищення безпеки людей, які використовують метрополітен як укриття.

#### Висновки

Отримано первинні результати важливої на сьогоднішній воєнний час задачі, а саме захисту вестибюлю метрополітену. Поставлена задача характеризується як комплексна і полягає в розвитку двох напрямів: оцінки вибухового впливу баражуючих боєприпасів та методики виявлення безпілотних літальних апаратів. У статті визначено міцність конструкції вестибюлю метрополітену за допомогою чисельного аналізу випадку вибухового впливу, а також наведено основи методики виявлення безпілотних літальних апаратів на базі інформаційних технологій.

Подальші дослідження в рамках цієї комплексної задачі заплановано продовжити для випадку масового потрапляння баражуючих боєприпасів у зону вестибюлю метрополітену з визначенням міцності та стійкості цієї конструкції, а також розвитку системи розподілених високочутливих акустичних приймачів для завчасного виявлення БПЛА.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азаренко О., Гончаренко Ю., Дівізінюк М., Камишенцев Г., Фаррахов О. Аналіз деяких аспектів терористичних вплив ударними дронами. *Collection of scientific papers «ЛОГОС»* (Oxford, 2 Feb. 2024). Oxford, 2024. С. 128–133. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-02.02.2024.024>
2. Босий Д. О., Саблін О. І., Потапчук І. Ю. Підвищення рівня безпеки об'єктів критичної інфраструктури транспорту на основі геопросторового аналізу акустичних портретів повітряних загроз. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. № 4. С. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-147-156>
3. Горда О. В., Червяков Ю. М., Григоровський А. П. Розробка будівельних інформаційних моделей процесу дистанційного обстеження аварійних будівель з використанням безпілотних літальних апаратів. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 3–4 (99–100). С. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/276530>
4. Сокольський С. О., Мовчанюк А. В. Огляд методів виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2021. № 87. С. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.87.46-55>
5. Сухаревський О. І., Василець В. О., Нечитайло С. В., Резніченко О. А., Кудряшов Г. В. Дослідження радіолокаційних характеристик моделі баражуючого боєприпасу “Shahed-136”. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2023. № 2 (51). С. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.51.07>
6. Тютюкін О. Л. *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро : Журфонд. 2020. 187 с.

7. Carter A. B., Schwartz D. N. *Ballistic missile defense*. Brookings Institution Press. 2010. 446 p.
8. Cherry C., Loukaitou-Sideris A., Wachs M. Subway station design and management: Lessons from case studies of contemporary terrorist incidents. *Journal of Architectural and Planning Research*. 2008. Vol. 25. Iss. 1. P. 76–90.
9. Hu Z., Jiang N., Zhang Y., Xia Y., Zhou C. Propagation of shock wave and structure dynamic response of explosion in a subway station: a case study of Wuhan subway station. *Journal of Vibroengineering*. 2020. Vol. 22. Iss. 6. P. 1453–1469. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21298>
10. Kameli M., Zarei S., Kalantari M., Nejad E. S. Criteria of Passive Defense in Subway Stations. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*. 2014. Vol. 4. Iss. 3. P. 298–304.
11. Oprean L.-G. Artillery and drone action issues in the war in Ukraine. *Scientific Bulletin*. 2023. Vol. 28. Iss. 1. P. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.2478/bsaft-2023-0008>
12. Tiutkin A. L. Study of the main parameters of the explosive effect for practical calculations of the strength and stability of tunnel structures. *Science and Transport Progress*. 2006. Vol. 12. P. 208–214. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2006/18870>

O. L. TIUTKIN<sup>1\*</sup>, D. O. BOSYI<sup>2</sup>, O. I. SABLIN<sup>3</sup>, N. K. BONDARENKO<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-475

<sup>2</sup>Dep. «Intelligent Energy Supply Systems», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 25, e-mail d.o.bosyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1818-2490

<sup>3</sup>Dep. «Environmental and Civil Security», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 13 03, e-mail o.i.sablin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

<sup>4</sup>Geotechnical Laboratory, Isotop Ltd., 20 Yarok St., Gadera, Israel, 7075001, tel. 04-8618000, e-mail tasha.zirka@gmail.com, ORCID 0000-0003-0804-7500

## Assessment of Explosive Impact and Methods for Detecting Unmanned Aerial Vehicles During Protection of the Metro Vestibule

**Purpose.** The authors set the goal of determining the basis for assessing the explosive impact of loitering munitions on the structure of the metro vestibule and developing a method for detecting unmanned aerial vehicles (UAVs) based on information technology. **Methodology.** The article analyzes two probable scenarios that characterize the strategy of a massive UAV attack. It is noted that these scenarios should be considered not in isolation from each other, but in combination, considering that the probability of a negative scenario is very high, even with the successful implementation of a positive one. The most common design of an underground vestibule (a three-span frame with two rows of columns) is considered. It is shown that an important informative feature of a UAV during flight is acoustic radiation, which allows detecting UAVs in conditions where optical and radar means do not provide the necessary accuracy. A finite element model of the metro vestibule was developed, which was built on the basis of real geometric dimensions using the professional calculation complex Structure CAD. **Findings.** To solve the first problem (negative scenario), an assessment of the strength of the metro vestibule was carried out. Analysis of the deformed state indicates a normal distribution of all components. It was determined that the equivalent stresses do not reach the design resistance for C25/30 concrete, and the safety margins on average reach 1.7...4.6 times, i.e. the designed structure withstands the combined load from its own weight and explosive load. To solve the second problem (positive scenario), a conceptual scheme for monitoring the condition of ground critical infrastructure objects in the area of laying the metro vestibule with the integration of an air threat detection system is proposed. **Originality.** The article first assesses the explosive impact of the loitering munition on the structure of the metro vestibule. Based on this assessment, the strength of the reinforced concrete structure of the vestibule as a potential shelter is determined. **Practical value** lies in the development of a method for detecting unmanned aerial vehicles based on information technology during the protection of the metro vestibule.

**Keywords:** metro; vestibule; unmanned aerial vehicle (UAV); acoustic radiation; strength assessment; shelter protection; critical infrastructure

## REFERENCES

1. Azarenko, O., Honcharenko, Yu., Diviziniuk, M., Kamyshentsev, H., & Farrakhov, O. (February, 2024). Analiz deiakykh aspektiv terorystychnykh vplyv udarnykh dronamy. *Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ* (pp. 128-133). Oxford, United Kingdom. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-02.02.2024.024> (in Ukrainian)
2. Bosyi, D. O., Sablin, O. I., & Potapchuk, I. Yu. (2024). Increasing the Security Level of Critical Transport Infrastructure Facilities Based on Geospatial Analysis of Acoustic Portraits of Air Threats. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 175(4), 147-156. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-147-156> (in Ukrainian)
3. Gorda, O. V., Chervyakov, Yu. M., & Hryhorovskiy, A. P. (2022). Development of building information models of the process of remote surveying of emergency buildings using uavs. *Science and Transport Progress*, 3-4(99-100), 79-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/276530> (in Ukrainian)
4. Sokolskyi, S. O., & Movchanyuk, A. V. (2021). Overview of Detection and Localization Methods of Small Unmanned Aerial Vehicles. *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, 87, 46-55. DOI: <https://doi.org/10.20535/radap.2021.87.46-55> (in Ukrainian)
5. Sukharevsky, O. I., Vasilets, V. O., Nechytailo, S. V., Reznichenko, O. A., & Kudriashov, H. V. (2023). Radar characteristics study of the model of “Shahed-136” barraging munition. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 2(51), 56-62. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.51.07> (in Ukrainian)
6. Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruksii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
7. Carter, A. B., & Schwartz, D. N. (2010). *Ballistic missile defense*. Brookings Institution Press. (in English)
8. Cherry, C., Loukaitou-Sideris, A., & Wachs, M. (2008). Subway station design and management: Lessons from case studies of contemporary terrorist incidents. *Journal of Architectural and Planning Research*, 25(1), 76-90. (in English)
9. Hu, Z., Jiang, N., Zhang, Y., Xia, Y., & Zhou, C. (2020). Propagation of shock wave and structure dynamic response of explosion in a subway station: a case study of Wuhan subway station. *Journal of Vibroengineering*, 22(6), 1453–1469. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21298> (in English)
10. Kameli, M., Zarei, S., Kalantari, M., & Nejad, E. S. (2014). Criteria of Passive Defense in Subway Stations. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 4(3), 298-304. (in English)
11. Oprean, L.-G. (2023). Artillery and Drone Action Issues in the War in Ukraine. *Scientific Bulletin*, 28(1), 73-78. DOI: <https://doi.org/10.2478/bsaft-2023-0008> (in English)
12. Tiutkin, A. L. (2006). Study of the main parameters of the explosive effect for practical calculations of the strength and stability of tunnel structures. *Science and Transport Progress*, 12, 208-214. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2006/18870> (in English)

Надійшла до редколегії: 07.02.2025

Прийнята до друку: 13.06.2025

## УДК 519.87:[625.022:624.272]

Д. С. СПІВАК<sup>1\*</sup>, С. В. КЛЮЧНИК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 200 07 64, ел. пошта d.s.spivak@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8155-7497

<sup>2</sup>Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, ел. пошта s.v.kliuchnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7771-8377

## Методика визначення ефективних параметрів трубобетонних балкових ферм з їздою зверху

**Мета.** У статті розглянуто методику пошуку ефективних розмірів головних розрізних балкових ферм із використанням трубобетону із трикутною решіткою та верхнім розташуванням проїзної частини. Основною метою роботи є розробка алгоритму, який дозволяє визначити оптимальні геометричні та конструкційні параметри таких ферм на основі комплексного врахування впливу матеріалів, навантажень і роботи елементів конструкції. **Методика.** Дослідження ґрунтується на чисельному моделюванні із застосуванням програмних комплексів Mathcad та ЛІРА–САПР. У його межах реалізовано метод рівномірного пошуку, що забезпечує генерацію всіх можливих комбінацій параметрів ферм, їх аналіз та фільтрацію відповідно до критеріїв ефективності. Основну увагу зосереджено на верхньому поясі ферм, виконаному з трубобетону, що дозволяє максимально реалізувати несну здатність трубобетонних елементів. Для розрахунків взято нормативні навантаження АК, НК, СК, а також проведено перевірку умов роботи трубобетонних елементів згідно з положеннями Єврокоду 4. **Результати.** Розроблений алгоритм дозволяє автоматично генерувати, перевіряти та фільтрувати варіанти з урахуванням меж несної здатності. Перевірка розрахункових результатів підтвердила їхню відповідність нормативним вимогам та ефективне використання матеріалів. Середній час розрахунку одного варіанту достатній для визначення ефективних трубобетонних перерізів, але не є граничним показником і свідчить про наявність потенціалу для подальшої оптимізації та прискорення алгоритму. **Наукова новизна.** Автори розробили методику пошуку оптимальних параметрів трубобетонних розрізних балкових ферм із трикутною решіткою та верхнім розташуванням проїзної частини. Уперше запропоновано деталізовану багаторівневу структуру розрахунку трубобетонних ферм за нормативними навантаженнями ДБН, при цьому розрахунок трубобетонних елементів здійснено відповідно до положень Єврокодів. **Практична значимість.** Розроблено адаптивний інструмент, призначений для оптимізації трубобетонних фермових конструкцій у мостобудуванні. Запропонований підхід сприяє зменшенню матеріаломісткості та забезпечує раціональне використання трубобетону в елементах головних балкових ферм.

*Ключові слова:* трубобетон; сталезалізобетонна балкова ферма; метод рівномірного пошуку; ефективні параметри; параметричний аналіз

### Вступ

Застосування трубобетону в мостобудуванні є поширеною практикою, передусім у склепінні аркових прогонових будов. Трубобетонні фермові мости використовують рідше, однак за останні 15 років реалізовано кілька значних проєктів, зокрема міст Ганхайзі (Ganhaizi Bridge, рис. 1, а) [8] завдовжки 1 611 м та міст Кеку (Keku Bridge, рис. 1, б) [14] завдовжки 6 431 м – найдовший трубобетонний міст у світі.

Заповнення сталевих труб бетоном сприяє підвищенню несної здатності та надійності мостових конструкцій. Трубобетон виявляє найкращі механічні властивості під час роботи на

стиск, тому його застосування у верхніх поясах ферм є найбільш доцільним. Крім того, трубобетонні елементи характеризуються підвищеною загальною стійкістю, а також кращою здатністю сприймати місцеві згинальні навантаження. Тому трубобетон може суттєво вплинути на визначення параметрів головних ферм, якщо вони не продиктовані певними обмеженнями чи умовами проєктування [13, 15].

Проведений у статті [8] аналіз свідчить про недостатній рівень дослідженості ефективних параметрів ферм з урахуванням багатофакторного впливу. Необхідність пошуку раціональних схем трубобетонних ферм з їздою зверху зумовлена не лише потребою у більш деталь-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ному вивченні ролі трубобетону в таких системах, а й важливістю виявлення закономірностей в умовах дії численних змінних.

*a – a*



*б – б*



Рис. 1. Трубобетонні ферменні мости:  
*a* – міст Ганхайзі; *б* – міст Кеку

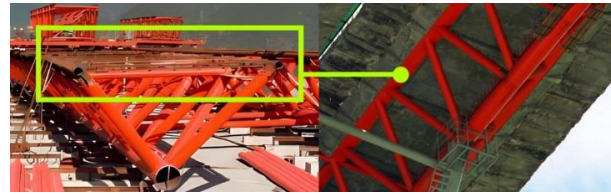
Fig. 1. Concrete-filled steel tube truss bridges:  
*a* – Ganhaizi Bridge; *b* – Keku Bridge

Прогонові будови з наскрізними фермами є складними просторовими системами, у яких головні елементи сприймають значні зусилля від дії статичних та динамічних навантажень. З огляду на це, а також інші конструкційні та експлуатаційні переваги, для зменшення зусиль передбачають монолітну залізобетонну плиту проїзної частини, яка працює спільно з фермою (рис. 2). У деяких випадках під плиту укладають металевий профільований лист, який також виконує функцію незнімної опалубки (рис. 2, *в*).

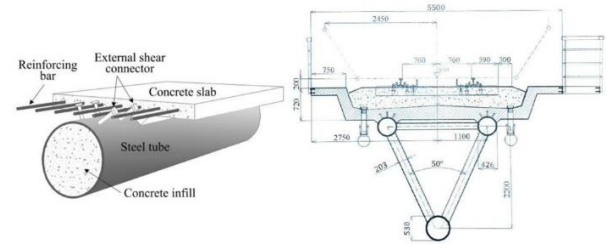
Фермові прогоони можуть мати розташування проїзної частини як зверху, так і знизу конструкції. За умови достатньої будівельної висоти перевагу надають варіанту їзди зверху. Проте для великих прогонів будівельна висота може виявитися зовеликою, що ускладнює розміщення конструкції в межах потрібних габаритів. У таких випадках доцільніше застосовувати ферми з розташуванням проїзної частини знизу, що дозволяє зменшити будівельну висоту конструкції [3].

Creative Commons Attribution 4.0 International  
doi: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332766>

*a – a*



*б – б*



*в – в*



Рис. 2. Види конструкції верхнього пояса в трубобетонних фермах їздою зверху:

- a* – об'єднання верхнього пояса ферми в рівні залізобетонної плити [11];
- б* – накладення залізобетонної плити на пояс ферми [5, 10];
- в* – з'єднання заповнення решітки з незнімною опалубкою з профільованих листів [16]

Fig. 2. Types of upper chord construction in concrete-filled steel tube trusses with top-deck traffic:

- a* – integration of the truss upper chord with the level of the reinforced concrete slab [11];
- b* – placement of the reinforced concrete slab on top of the truss chord [5, 10];
- c* – integration of the lattice infill with permanent profiled sheet formwork [16]

Для класичних ферм з їздою знизу навантаження передається на вузли ферми, а в мостах з їздою зверху навантаження часто передається на верхній пояс ферм між вузлами, викликаючи додаткові згинальні моменти. Найпоширенішим варіантом компонування трубобетонних фермових мостів є розміщення проїзної частини над прогоновою будовою. У цьому випадку залізобетонну плиту або інтегрують у верхній пояс ферм, формуючи єдиний монолітний елемент, або укладають безпосередньо на верхні пояси. У другому випадку це спричиняє виник-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

нення більш виражених згинальних моментів у панелях.

Сучасні фермові мости зазвичай мають трикутну решітку з висхідними та низхідними розкосами, розташованими під кутом  $40\text{--}60^\circ$  до горизонталі [6]. Подібний діапазон нахилу спостерігається і для пустотілих, і для заповнених бетоном розкосів у наявних трубобетонних фермах.

Більшість збудованих трубобетонних фермових прогонів виконано за нерозрізною системою. Нерозрізні ферми характеризуються певними економічними перевагами, зокрема зменшеними витратами металу та підвищеною жорсткістю. Водночас розрізна система конструкції залишається актуальним об'єктом дослідження завдяки її гнучкості в проектуванні, а також простоті виготовлення та монтажу.

Трубобетонні мости в Україні не є популярним рішенням, натомість кількість сталезалізобетонних мостів значна. Аналіз статистичних даних щодо використання сталезалізобетонних прогонових будов із наскрізними фермами в Україні, наведених в [1], указує на такі тенденції:

- у розрізних системах з їздою знизу переважно перекриті середні та великі прогони. Варіанти з їздою зверху застосовують здебільшого для середніх прогонів, вони зазвичай охоплюють менші відстані, ніж конструкції з їздою знизу. Водночас наведені дані не дозволяють зробити однозначний висновок щодо переваг того чи іншого компонування;

- у нерозрізних системах спостерігається протилежна закономірність: ферми з їздою зверху застосовують частіше, вони, як правило, характеризуються нижчим рівнем споживання сталі порівняно з фермами з їздою знизу. Проте найдовший зафіксований прогін було перекрито саме фермою з їздою знизу.

З огляду на переваги трубобетону як конструкційного матеріалу, зокрема його економічності, а також зважаючи на поточний стан трубобетонних ферм як у конструкційному плані, так і в аспекті їх практичного застосування в Україні, постає необхідність у визначенні ефективних параметрів таких конструкцій. Це своєю чергою сприятиме кращому розумінню особливостей проектування та використання трубобетонних ферм і дозволить чіткіше окрес-

лити межі ефективних розмірів для конкретних умов проектування.

Для дослідження цього питання у статті [8] було запропоновано та обґрунтовано метод рівномірного пошуку і розрахунку варіантів балкових трубобетонних ферм з їздою зверху. Об'єктом дослідження виступають головні балкові ферми з їздою зверху, для яких далі детально розглянуто алгоритм застосування запропонованого методу.

### Мета

Основною метою статті є розробка та демонстрація алгоритму пошуку ефективних розмірів розрізних головних ферм із трикутною решіткою та використанням трубобетону.

### Методика

Конструкційна схема досліджуваної прогонової будови (рис. 3) передбачає наявність залізобетонної плити проїзної частини та пласкої ферми з трикутною формою решітки. Ферма складається з елементів верхнього та нижнього поясів, а також елементів, що утворюють решітку. До останніх належать вертикальні стрижні, які виконують функцію крайніх стійок, та похилі стрижні, що відіграють роль розкосів. Усі зазначені елементи беруть участь у спільній роботі конструкційної системи, що зумовлює відповідний підхід до її розрахунку.

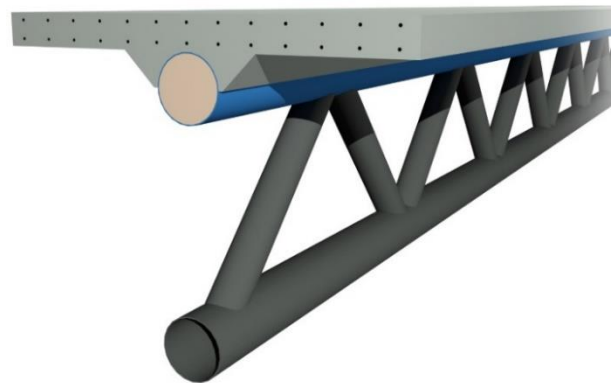


Рис. 3. Конструкція досліджуваної прогонової будови

Fig. 3. Structural configuration of the investigated bridge span structure

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Одним із ключових питань під час компонування прогонової будови з їздою зверху є вибір кількості головних ферм у поперечному перерізі мосту. У розрахунковій моделі передбачено можливість двох і більше площин ферм у межах одного прогону. Для забезпечення їх сумісної просторової роботи необхідно гарантувати стійкість площин ферм у напрямку, перпендикулярному до їхньої площини. У межах цього дослідження цей аспект не розглянуто, а умовно взято, що необхідна просторова жорсткість досягається завдяки застосуванню горизонтальних та/або нахилених до горизонту поперечних в'язей, а також залізобетонної плити проїзної частини.

На основі аналізу мостових конструкцій та особливостей трубобетону в розрахунках взято, що бетонування виконано лише для стиснених елементів труб верхнього пояса. Заповнення розкосів не передбачено не лише через технологічні труднощі, а й з огляду на конструкційну специфіку системи, яка полягає в досягненні граничного стану міцності переважно в з'єднаннях між елементами, а не в самих розкосах [7]. Бетонування нижнього пояса зазвичай застосовують лише в нерозрізних прогонах, де на опорах виникають стискальні зусилля. У розрізних прогонах бетонування розтягнутих поясів не забезпечує істотних переваг, за винятком певного підвищення жорсткості та міцності вузлів на продавлювання.

Як зазначено у [8], метод рівномірного пошуку є доволі ресурсоємним із точки зору обчислювальних витрат, однак забезпечує повне охоплення всіх можливих комбінацій параметрів, включених до розрахунку. Методика дослідження умовно структурована на три рівні: «групи блоків дій», «блоки дій» та окремі «дії» (рис. 4). Загальна схема дослідження містить кілька груп дій (рис. 5), зокрема групи № 1–5 формують основний розрахунковий модуль, у межах якого генеруються всі можливі комбінації параметрів: зокрема геометричних характеристик фермових схем, поперечних перерізів елементів і фізико-механічних властивостей матеріалів. У групі № 6 реалізується етап фільтрації отриманих варіантів ферм згідно із заданими критеріями та здійснюється обробка результатів розрахунків.



Рис. 4. Організація позначень рівнів схеми дослідження

Fig. 4. Notation system for the levels in the research scheme



Рис. 5. Схема групи дій дослідження

Fig. 5. Scheme of research action groups

Основна ідея розрахунку полягає у визначенні об'ємів витрат матеріалів шляхом підбору перерізів елементів верхнього пояса ферми, виконаного з класичного трубобетону круглого перерізу. Оптимізаційна завдання зводиться до вибору таких варіантів конструкційного рішення, які характеризуються найнижчими оцінками (балами), що своєю чергою відповідає мінімальним витратам матеріалів з урахуванням їхніх фізико-механічних властивостей.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Урахування всіх факторів у межах одного розрахунку є складним завданням, тому в цьому дослідженні увагу зосереджено на окремому аспекті, який дозволяє встановити чіткі обмеження для варіативності заданої форми ферм. Інакше кажучи, за межами обраного підходу не передбачено розширення простору можливих конфігурацій. Найбільш доцільним у цьому контексті є виконання розрахунків за першою групою граничних станів, яка, згідно з українськими нормативними документами, належить до основного типу розрахункових умов.

Метод дослідження базується на чисельному моделюванні та автоматизованій обробці результатів із використанням програмних комплексів ЛІРА–САПР та Mathcad. У середовищі Mathcad виконано основні розрахункові операції, зокрема формування варіантів, створення розрахункового файлу з варіантами для пошуку ліній впливу в ЛІРА–САПР, підбір перерізів

елементів та обробка отриманих результатів. У комплексі ЛІРА–САПР здійснено завантаження розрахункового файлу, проведення розрахунків і експорт результатів ліній впливу для подальшої обробки в Mathcad.

У зв'язку з тим, що групи дій виконують послідовно й упорядковують так, щоб уникати взаємного перетину, подальший аналіз кожної з них можна здійснювати окремо.

*Група дій № 1.* У межах цієї групи здійснюються формування розрахункового файлу для програмного комплексу ЛІРА–САПР (рис. 6). ЛІРА–САПР підтримує введення вихідних даних у текстовому режимі за допомогою файлів формату txt. Такий файл складається з так званих «документів», кожен із яких має свій номер і відповідає певному типу даних, зокрема координат вузлів, номерів елементів, типів шарнірних з'єднань тощо [2].

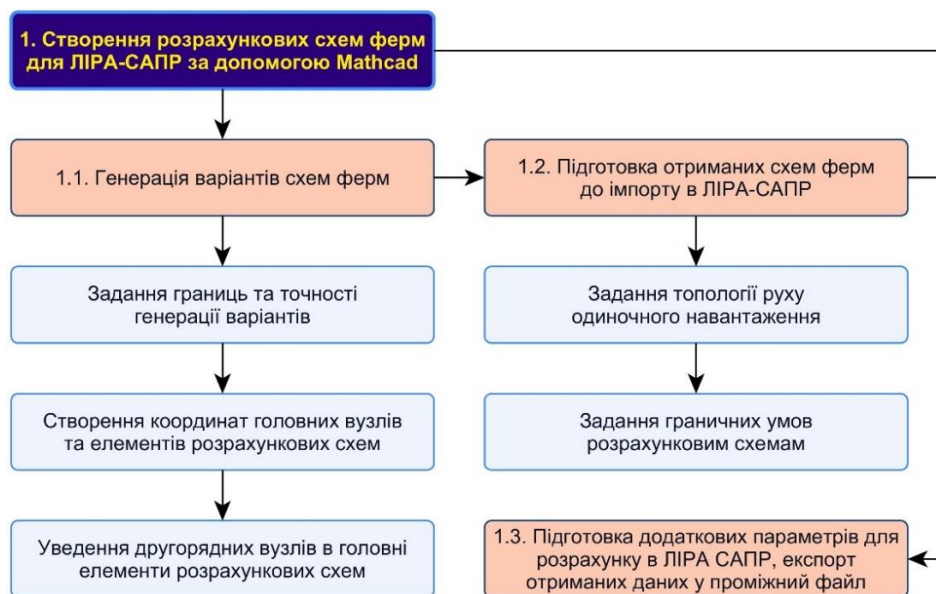


Рис. 6. Дії створення розрахункових схем ферм для ЛІРА–САПР за допомогою Mathcad

Fig. 6. Steps for creating truss calculation models for LIRA–SAPR using Mathcad

Формування файлу txt здійснюють у середовищі Mathcad на основі попередньо визначених генеральних розмірів ферм. На цьому кроці визначають форму решітки, головні розміри схем: розрахункову довжину, висоту ферми та довжину панелі.

Оскільки подальший розрахунок варіантів передбачає побудову ліній впливу в програмному комплексі ЛІРА–САПР, необхідно врахо-

увати особливості структури вхідних даних, зокрема:

1. Для забезпечення достатньої точності визначення зусиль не лише згинального моменту  $M$  та поперечної сили  $Q$ , але й у деяких випадках нормальної сили  $N$ , необхідно розбивати головні елементи ферми на декілька частин, умовно названих другорядними елементами. Створено геометричні схеми ферми, які містять

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

розкоси, стійки та підвіски, і виконано різну кількість поділів головних елементів. На рис. 7, а та б наведено приклади для порівняння результатів розрахунків у разі розділення на 8 та 320 другорядних елементів відповідно.

Аналіз показав, що розбиття на 8 елементів забезпечує оптимальну точність для зусиль  $M_y$  та  $N$ , оскільки в разі подальшого збільшення кількості елементів до 320 різниця між результатами не перевищує 0,42 %.

Водночас для визначення поперечної сили  $Q_z$  потрібна значно більша деталізація. Зокрема, щоб досягти похибки менше 1 %, необхідно застосовувати понад 300 другорядних елементів для кожного стрижня, що суттєво збільшує обчислювальне навантаження. У дослідженні встановлено, що в разі розбивання на 8 елементів похибка для  $Q_z$  становить майже 8 %, що не перевищує загальноприйнятого граничного значення 10 %. Тому для компонентів  $Q_z$  було впроваджено правило округлювання, яке детальніше розглянуто в групі дій № 4.

Для підтвердження достовірності розрахунків модель із розбиттям на 8 елементів додатково перевірено в середовищі програмного комплексу Selena, зокрема для компоненти  $M_y$ , як показано на рис. 7, в.

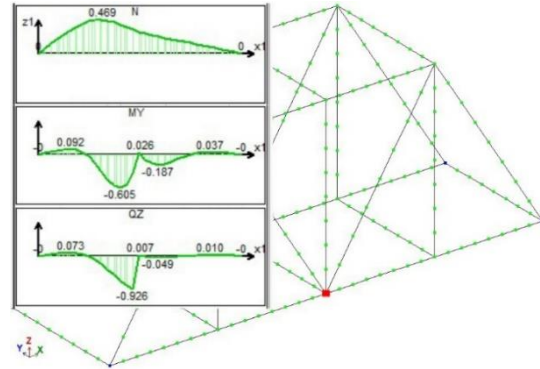
2. Нумерацію вузлів не задають вручну, а формують автоматично в порядку появи вузлів у текстовому розрахунковому файлі. Водночас елементи (стрижні) у файлі задають з прив'язкою до вже присвоєних номерів вузлів.

3. У середовищі Mathcad реалізовано функції імпорту та експорту даних для окремих форматів, однак відсутня можливість прямого експорту результатів у формат txt із записом у конкретний рядок. Така функціональність є необхідною для уникнення додаткової обробки об'ємних таблиць результатів, які містять порожні комірки, що потребують заповнення нульовими значеннями, спричиняючи додаткові витрати часу та обчислювальних ресурсів. Із метою оптимізації цього процесу реалізовано проміжний етап запису результатів у файл формату Excel, використання якого дозволяє точно визначати адресу комірки для розміщення даних. Після цього виконують імпорт файлу Excel, а далі – експорт отриманих даних до файлу txt.

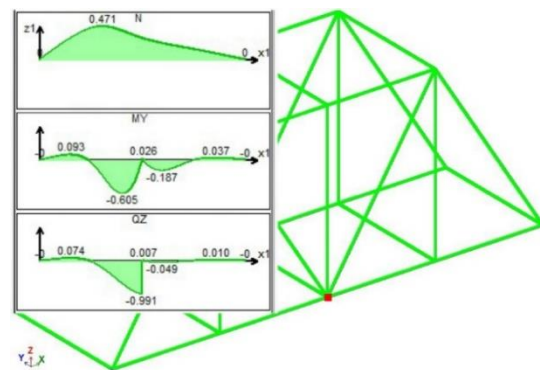
4. У процесі імпорту файлу формату txt програмний комплекс ЛІРА–САПР може видавати

помилку через надмірну довжину окремих рядків даних. Щоб уникнути цього обмеження, впроваджено розбиття рядків, у кожному з яких не перевищено умовну межу в 30 числових значень.

а – а



б – б



в – в

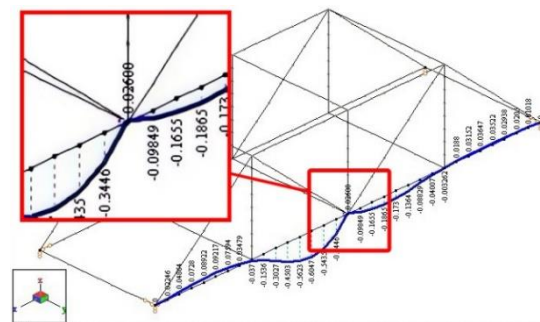


Рис. 7. Результати ліній впливу зусиль залежно від точності розділення головних елементів на:  
а – 8 другорядних елементів;  
б – 320 другорядних елементів; в – 8 другорядних елементів у програмі Selena для зусилля  $M_y$

Fig. 7. Influence line results of forces depending on the subdivision accuracy of main elements into:  
а – 8 secondary elements; б – 320 secondary elements;  
в – 8 secondary elements in the Selena software for the bending moment  $M_y$

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

*Група дій № 2.* Особливе місце у функціоналі програмного комплексу ЛІРА–САПР посідає побудова ліній впливу – діаграм, які відображають зміну зусиль або переміщень у заданому елементі конструкції залежно від положення одиничного рухомого навантаження. Побудову таких діаграм здійснюють за допомогою відповідного функціонального модуля, у якому задають траєкторію руху навантаження та обирають цільовий параметр, наприклад, згинальний момент або нормальну силу.

У процесі створення розрахункових схем у середовищі Mathcad визначають саме ті зусилля, лінії впливу яких підлягають розрахунку

та подальшому експорту з ЛІРА–САПР. З урахуванням напрямку дії навантаження та узятій в ЛІРА–САПР системи координат виконують розрахунки та експорт значень згинальних моментів  $M_y$ , поперечних сил  $Q_z$  та поздовжніх зусиль  $N$ .

Кінцевою метою вказаної послідовності дій є перенесення результатів розрахунку ліній впливу до середовища Mathcad для подальшої обробки (рис. 8). Приклад побудованих розрахункових схем, згенерованих у Mathcad та завантажених до ЛІРА–САПР, наведено на рис. 9.



Рис. 8. Дії розрахунку схем ферм у ЛІРА–САПР та занесення результатів ліній впливу в Mathcad

Fig. 8. Steps of truss model calculation in LIRA–SAPR and input of influence line results into Mathcad

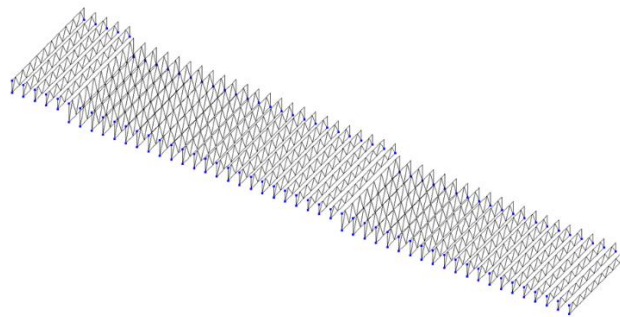


Рис. 9. Приклад створених у Mathcad 50 розрахункових схем ферм та імпортованих у ЛІРА–САПР

Fig. 9. Example of 50 truss calculation models created in Mathcad and imported into LIRA–SAPR

*Група дій № 3.* Ця група дій передбачає визначення постійних і тимчасових вертикальних навантажень (рис. 10). У дослідженні розглянуто три моделі тимчасових навантажень, що базуються на положеннях Державних будівельних норм України, від рухомого складу автодо-

рожніх мостів (моделі АК і НК) та рухомого складу залізничних мостів (модель СК). Відповідно визначення розрахункових значень навантажень також здійснено за вимогами чинних ДБН.



Рис. 10. Дії визначення постійних і тимчасових вертикальних навантажень

Fig. 10. Steps for determining dead loads and temporary vertical loads

До основних постійних навантажень, які враховують у розрахунках, належать власна вага ферми, залізобетонної плити проїзної частини та її покриття. Власну вагу ферми враховують на етапі підбору кожного окремого поперечного перерізу: для попередньо взятого варіанту перерізу визначають його вагу, після чого обчислюють відповідні зусилля – нормальну силу  $N$ , згинальний момент  $M$  та поперечну силу  $Q$  згідно з положеннями будівельної механіки. Отримані зусилля від власної ваги додають до основних розрахункових зусиль, попередньо визначених для тимчасових і решти постійних навантажень.

*Група дій № 4.* Загальну структуру цього етапу представлено на рис. 11. Насамперед виконують редагування, фільтрування, розділення та структурування отриманих даних ліній впливу з програмного комплексу ЛІРА–САПР. Із загального масиву даних виокремлюють зусилля  $N$ ,  $M$ , та  $Q_z$  відповідно до попередньо заданих параметрів у розрахунковому файлі задачі. Далі ці дані проходять фільтрацію з метою визначення максимальних та мінімальних значень для кожного перерізу додаткового елемента.

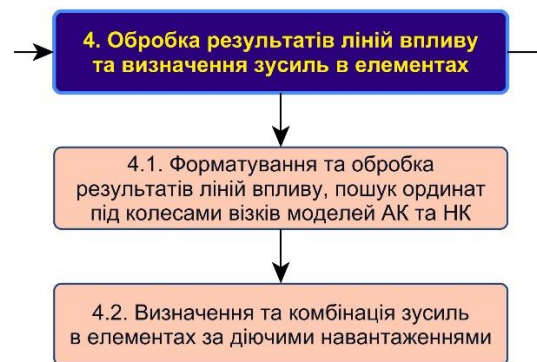


Рис. 11. Дії обробки результатів ліній впливу та визначення зусиль в елементах

Fig. 11. Steps for processing influence line results and determining forces in elements

Для визначення зусиль під колісними навантаженнями моделей АК та НК, згідно з принципами розрахунку за лініями впливу, необхідно визначити ординати під точками прикладання зосередженого навантаження. Але в процесі пакетного експорту даних із ЛІРА–САПР втрачається інформація про геометричну форму лінії впливу для кожного елемента. Тому для вирішення цього питання застосовано аналітичні формули, що описують зусилля згідно з положеннями будівельної механіки. Форми ліній впливу подано в табл. 1.

Таблиця 1

## Форми лінії впливу зусиль у верхньому поясі

Table 1

## Shapes of influence lines for forces in the upper chord

№ з/п	Вид зусилля	Форма лінії впливу	Розташування колісного навантаження
1	$N$	Трикутник на розрахункову довжину прогону з максимальною ординатою посередині	На максимальній ординаті розташована найближча до центра вісь візка
2	$M_y$	Трикутник на довжину панелі з максимальною ординатою посередині	На максимальній ординаті розташована найближча до центра вісь візка
3	$Q_z$	Трикутник на довжину панелі, помножену на відношення максимальної ординати до 1. Положення максимальної ординати з краю визначеної довжини	На максимальній ординаті розташована крайня вісь візка

Група дій № 5. У межах цієї групи дій ц середовищі Mathcad реалізовано алгоритм підбору параметрів перерізів і матеріалів (рис. 12), які підлягають перевірці та аналізу відповідно до вимог нормативних документів Єврокоду.

Зазначені документи офіційно впроваджені для використання в Україні та забезпечують сучасну, науково обгрунтовану й конкурентоспроможну методологію розрахунку трубобетонних елементів [8].



Рис. 12. Дії визначення матеріалів та підбору перерізів трубобетонних елементів за Єврокодами

Fig. 12. Steps for determining materials and selecting cross-sections of concrete-filled steel tube elements according to Eurocodes

Для розрахунку трубобетонних елементів у мостових конструкціях рекомендовано застосовувати Єврокод 4, частину 2, яка в Україні імплементована як ДСТУ–Н Б EN 1994–2:2012 «Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 2. Загальні правила і правила для мостів» [4]. Варто зазначити, що хоча вказаний нормативний документ має офіційний статус, його чинна редакція містить помилки у формулах та рекомендованих значеннях, які можуть призводити до неправильних результатів. У зв'язку з цим доцільно здійснювати перевірку

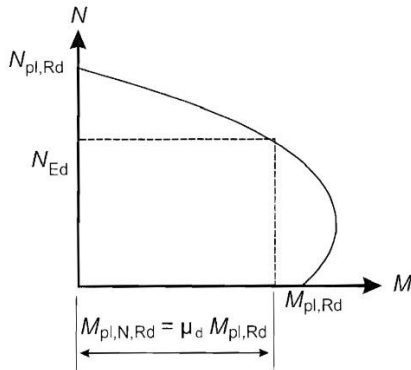
положень української версії з оригінальним текстом Єврокоду.

Розрахунок за методом Єврокоду враховує ефекти другого порядку, що виникають під час пластичної поведінки елемента внаслідок деформацій, спричинених прикладеними навантаженнями. Основною і завершальною перевіркою трубобетонних перерізів є оцінка опору елемента за умови спільної дії осьового стиску та одноосового згину. У межах цієї перевірки передбачено побудову кривих взаємодії між осьовою силою та згинальним моментом

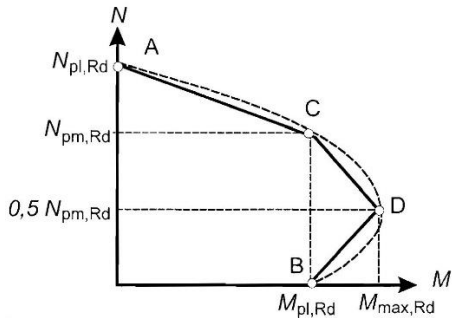
ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

(рис. 13, а). Криву взаємодії побудовану на основі чотирьох характерних точок можна подати в спрощеному вигляді (рис. 13, б).

а – а



б – б



в – в

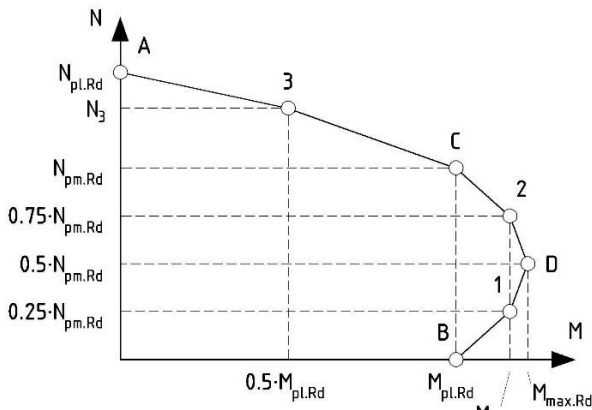


Рис. 13. Варіанти кривої взаємодії сумісного стиску та одноосьового згину:  
а – гладка форма; б – спрощена форма;  
в – розширена спрощена форма

Fig. 13. Variants of the interaction curve for combined compression and uniaxial bending:  
а – smooth form; б – simplified form;  
с – extended simplified form

У наукових публікаціях [9, 12] пропонувано введення додаткової точки на відрізку А–С з метою підвищення точності апроксимації кривої. У межах цього дослідження також було прийнято рішення розмістити додаткову точку на відрізку А–С та додаткові точки на відрізках С–D та D–B (рис. 13, в). Такий підхід дозволяє більш точно відтворити допустиму область несної здатності елемента та підвищити точність визначення найефективніших поперечних перерізів під заданими значеннями внутрішніх зусиль.

Відповідно до положень п. 6.7 [4] розроблено алгоритм визначення поперечного перерізу трубобетонного елемента, що наведений на рис. 14. Геометричні параметри перерізів задають попередньо: передбачена можливість довільної генерації розмірів із заданою дискретністю та варіаціями, або використання стандартного сортаменту труб. Фізико-механічні характеристики матеріалів також задають наперед та відповідно до нормативних значень, наведених у ДБН або Єврокодах.

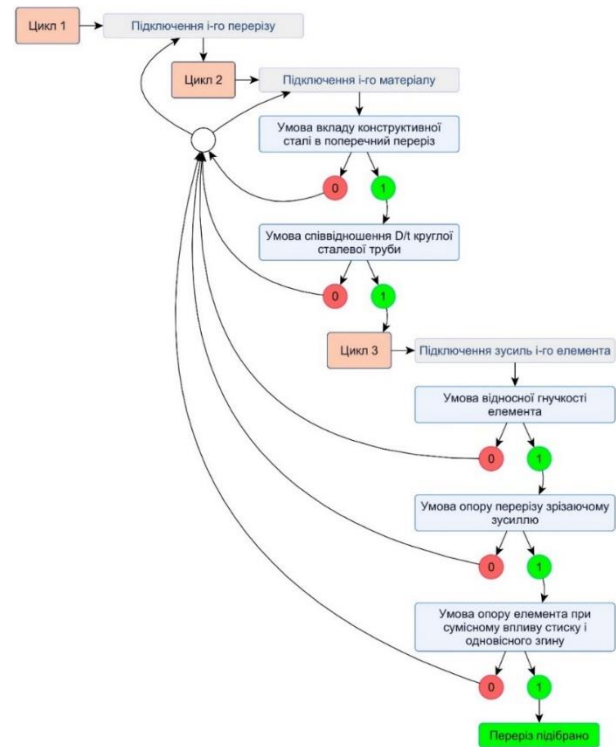


Рис. 14. Загальна схема ітераційного процесу пошуку ефективного перерізу для елемента

Fig. 14. General scheme of the iterative process for finding the efficient cross-section of an element

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Група дій № 6. Це завершальна група дій, яка відповідає фінальному етапу, передбаченому схемою дослідження (рис. 15). Результати, отримані на стадії підбору трубобетонних перерізів, підлягають подальшому аналізу з метою визначення оптимальних геометричних та конструкційних параметрів трубобетонних ферм.

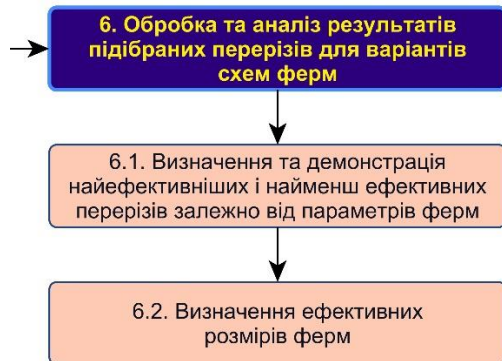


Рис. 15. Дії обробки та аналізу результатів підібраних перерізів для варіантів схем ферм

Fig. 15. Steps for processing and analyzing results of selected cross-sections for truss model variants

### Результати

Для реалізації створеного алгоритму сформовано послідовність дій, що потребують ручного виконання:

1. Введення діапазону варіантів схем ферм, що підлягають генерації, для формування розрахункового документа у форматі txt та подальшого розрахунку в програмному комплексі ЛІРА–САПР.

2. За потреби – очищення раніше сформованих файлів-шаблонів, які використовують для запису нових даних.

3. Гортання документа Mathcad до розділу, в якому виконують функцію запису отриманих даних до розрахункового файлу у форматі txt для ЛІРА–САПР. На цьому етапі також здійснюють згаданий вище проміжний експорт та імпорт даних за допомогою файлу Excel.

4. Перевірка повноти записаних даних у файл формату txt, імпорт цього файлу до ЛІРА–САПР та запуск повного розрахунку шляхом активації відповідної команди – «Ви-

конати повний розрахунок».

5. Після успішного завершення розрахунку в ЛІРА–САПР виконують збереження результатів ліній впливу у форматі csv за допомогою функції створення документації і таблиць у модулі «Таблиці системи МОСТ».

6. Повернення до документа Mathcad, імпорт отриманого файлу csv з результатами ліній впливу та гортання документа до розділу, де відбувається фінальне виведення розрахункових результатів.

З урахуванням необхідності прямого втручання в керування процесом середній час виконання повного розрахунку десяти схем ферм у перерахунку на один варіант становив 2,5 хвилини. З огляду на наявний потенціал алгоритму, існують перспективи його подальшого вдосконалення з метою підвищення ефективності та скорочення часу обчислень.

Фінальним результатом підбору перерізів є узагальнена форма, у якій наведено геометричні характеристики перерізів, фізико-механічні властивості сталевих і бетонних матеріалів із відповідним позначенням їхніх класів, а також значення зусиль, що діють у заданому елементі конструкції (рис. 16).

Для візуальної перевірки передбачено відображення кривої взаємодії та відповідних зусиль. На рис. 17 представлено діаграму отриманих результатів для довільно обраного елемента. Вертикальна лінія  $M_{pl.n.Rd}$  виконує функцію додаткового обмеження граничного згинального моменту на рівні дії поздовжнього зусилля  $N_{Ed}$ . Згідно з вимогами п. 6.7.3.6 [4], величина  $M_{pl.n.Rd}$  завжди є меншою за фактичне значення граничного моменту, що відповідає рівню зусилля  $N_{Ed}$ .

Багаторазова перевірка фінальних та проміжних результатів, зокрема кривої взаємодії та умов перевірки відповідно до вимог Єврокоду, підтвердила достовірність отриманих результатів. Реалізований алгоритм розрахунку та задані навантаження забезпечили майже повне використання несної здатності трубобетонних елементів, що виявилось в наблизенні розрахункових зусиль до граничних значень кривої взаємодії.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

EN_AK_max_planes_1 =						
1	1	"Group #"	"D [m]"	"t [m]"	"Площа сталі [м <sup>2</sup> ]"	"Площа бетону [м <sup>2</sup> ]"
2	5		0.1	0.005	0.00149	0.00636
3	5		0.2	0.005	0.00306	0.02835
4	5		0.1	0.005	0.00149	...
6						
1	"Label"	"Оцінка"	"Group №"	"f.y [кПа]"	"f.yd [кПа]"	"t.min [мм]"
2	"Personal"	0.01342	1	235000	235000	0
3	"Personal"	0.03336	1	355000	355000	0
4	"Personal"	0.01342	1	235000	235000	...
12						
1	"t.max [мм]"	"Grade, S"	"Label"	"Group #"	"f.ck [кПа]"	"f.cd [кПа]"
2	40	235	"EN, S235"	1	20000	13333.33333
3	40	355	"EN, S355"	1	25000	16666.66667
4	40	235	"EN, S235"	1	20000	...
18						
1	"f.cm [кПа]"	"E.cm [кПа]"	"Grade, C"	"Label"	"Оцінка"	"Назва групи"
2	28000	30000000	20	"EN, C20/25"	0.91087	"Верхній пояс"
3	33000	31000000	25	"EN, C25/30"	1.27174	"Верхній пояс"
4	28000	30000000	20	"EN, C20/25"	0.91087	...
24						
1	"№ групи елементів"	"№ варіанту"	"Глобальний № елементу"	"Номер перерізу"	"Елемент пройшов = NaN."	"Категорія дороги"
2	1	1	1	1	NaN	"Іа - 8 смуг"
3	1	1	5	2	NaN	"Іа - 8 смуг"
4	1	1	1	1	NaN	...
30						
1	Кількість основних смуг руху"	"Основні + додаткові смуги"	"M.Ed"	"N.Ed"		
2	8	10	1.58457	20.37599		
3	8	10	67.87138	22.02674		
4	6	8	3.40718	...		

Рис. 16. Результати визначення трубобетонних перерізів для довільних 3 елементів

Fig. 16. Results of determining concrete-filled steel tube cross-sections for three arbitrary elements

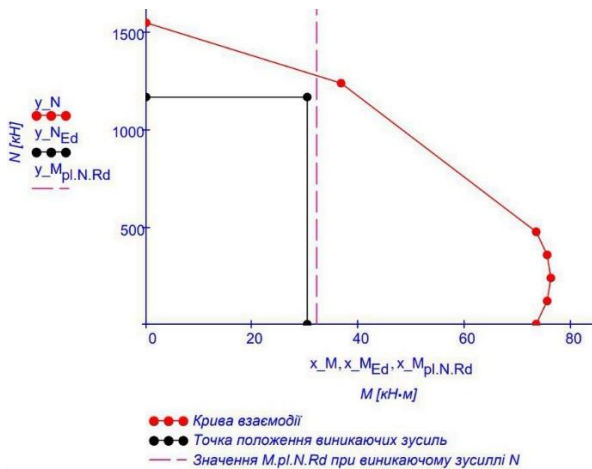


Рис. 17. Результат кривої взаємодії для одного з розрахованих елементів

Fig. 17. Interaction curve result for one of the calculated elements

### Наукова новизна та практична значимість

Розроблено методику пошуку оптимальних параметрів трубобетонних розрізних балкових ферм із трикутною решіткою та верхнім розташуванням проїзної частини, що забезпечує комплексне врахування геометричних, конструкційних характеристик і матеріалів. Наведе-

### Висновки

У роботі представлено алгоритм та структуру його реалізації для пошуку раціональних трубобетонних перерізів, призначених для елементів верхнього пояса балкових ферм. Особливістю досліджуваної конструкції є верхнє розташування проїзної частини та використан-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ня трикутної решітки. На основі розробленої методики можна сформулювати такі висновки:

1. На цьому рівні розрахунків із комбінуванням Державних будівельних норм України та Єврокодів не було виявлено суперечностей між ними. Крім того, Єврокоди адаптовані в Україні як національні стандарти, що дає можливість їх вільного застосування для проектування трубобетонних конструкцій на відміну від інших зарубіжних нормативів.

2. У середовищі Mathcad розроблено автоматизований алгоритм для пакетного обчислення групи варіантів схем. Поєднання Mathcad із програмним комплексом ЛПРА–САПР забезпечило ефективний інструмент для геометричного та чисельного моделювання, що зменшує потребу у втручанні користувача в ітеративні і трудомісткі етапи розрахунків.

3. Для забезпечення більшої практичності розрахунків враховано моделі автомобільного навантаження АК, НК, а також залізничного навантаження СК з урахуванням різних конфігурацій прогонових будов – кількості площин ферм у складі прогону та кількості смуг руху.

4. Реалізований алгоритм розрахунку та застосовані навантаження забезпечили майже повне використання несної здатності трубобетонних елементів, що виявилось в наблизенні значень зусиль до граничних значень кривої взаємодії.

5. За прямого втручання в керування процесом середній час виконання повного розрахунку десяти варіантів ферм становив 2,5 хвилини на один варіант. З огляду на потенціал алгоритму існує можливість його подальшого вдосконалення з метою підвищення ефективності та пришвидшення обчислень.

6. Створена форма для виконання розрахунків є доступною для використання і внесення модифікацій і може бути адаптована до конкретних інженерних задач у межах проектування розрізних ферм. Такий підхід підвищує практичну цінність запропонованого рішення. Автоматизовані алгоритми подібного типу є невід'ємною частиною сучасного проектування, забезпечують виконання рутинних розрахунків та дозволяють зосередитись на більш творчих завданнях.

7. На цьому етапі методика побудована таким чином, що дозволяє врахувати всі можливі комбінації ферм і перерізів. Подальше уточнення алгоритму сприятиме звуженню вибірки прийнятних варіантів схем ферм. Наразі одним із пріоритетних чинників такого звуження є відсутність визначення фактичної жорсткості ферми після підбору перерізів, що створює передумови для перерозподілу напружено-деформованого стану конструкції.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балабух Я. А. Ефективність сталезалізобетонних автодорожніх мостів. *Дороги і мости*. 2010. Вип. 12. С. 16–23.
2. Городецкий А. С., Евзеров И. Д., Мельников С. Л., Мексименко В. П. *Програмный комплекс «ЛПРА-Windows»*. Київ : НДІАСБ, 1997. 658 с.
3. Гулага Б. І, Лобач Р. Б. Можливість використання структурних конструкцій для прогонових будов автодорожніх мостів. *Секція «Мости, конструкції та будівельна механіка» Збірник наукових праць 83-ї міжнародної студентської наукової конференції* (Харків, 12–16 квітня 2021 року). ХНАДУ. Харків, 2021. С. 106–119.
4. *ДСТУ-Н Б EN 1994-2:2012 Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 2. Загальні правила і правила для мостів (EN 1994-2:2005, IDT)*. [Чинний від 01.07.2013]. Київ, 2013. 120 с.
5. Корнієв М. М. *Сталеві мости: теоретичний та практичний посібник з проектування* : у 3 т. Київ : Вид-во «Ультрадрук», 2018. Т. 3. 542 с.
6. Радкевич А. В., Лісняк М. О., Горбатюк Ю. М., Лихопьок П. А. *Відновлення штучних будов*. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазар., 2018. 406 с.
7. Співак Д. С., Ключник С. В. Вплив матеріалів і масштабного фактора на руйнування К-подібних вузлів трубобетонних мостів: ефективність конструктивних параметрів. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 1 (109). С. 152–169. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/324909>

8. Співак Д. С., Ключник С. В. Критичний аналіз розвитку конструкції решітчастих трубобетонних мостів з іздою зверху. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 1 (105). С. 105–112.  
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/301524>
9. Albareda-Valls A., Maristany Carreras J., Calderón Valdiviezo L., Muñoz Blanc C. Implementación del efecto de pandeo en el método simplificado del ec4-1-1 para secciones tubulares mixtas. *Hormigón y Acero*. 2019. Vol. 70. Iss. 288. P. 21–33. DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2019.001>
10. Cho J., Moon J., Ko H.-J., Lee H.-E. Flexural strength evaluation of concrete-filled steel tube (CFST) composite girder. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. Vol. 151. P. 12–24.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.038>
11. Ganhaizi Bridge. *HighestBridges.com*. URL: [https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Ganhaizi\\_Bridge](https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Ganhaizi_Bridge) (in English)
12. Ketema E., Taye S. Design chart procedures for polygonal concrete-filled steel columns under uniaxial bending. *SINET: Ethiopian Journal of Science*. 2006. Vol. 29. Iss. 1. P. 1–16.  
DOI: <https://doi.org/10.4314/sinet.v29i1.18255>
13. Long Y.-L., Zeng L., Gardner L., Wade M. A. A new model for calculating the elastic local buckling stress of steel plates in square CFST columns. *Thin-Walled Structures*. 2022. Vol. 171. P. 108756.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108756>
14. Pu B., Zhou X., Liu Y., Liu B., Jiang L. Mechanical behavior of concrete-filled rectangular steel tubular composite truss bridge in the negative moment region. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2021. Vol. 8. Iss. 5. P. 795–814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.09.002>
15. Schnabl S., Jelenić G., Planinc I. Analytical buckling of slender circular concrete-filled steel tubular columns with compliant interfaces. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 115. P. 252–262.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.035>
16. 好消息！你们去川藏北线看红叶的路上，汶马高速这座桥合龙\_澎湃号·政务\_澎湃新闻.  
URL: [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_2597829](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_2597829)

D. S. SPIVAK<sup>1\*</sup>, S. V. KLIUCHNYK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 200 07 64, e-mail [d.s.spivak@ust.edu.ua](mailto:d.s.spivak@ust.edu.ua), ORCID 0000-0002-8155-7497

<sup>2</sup>Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail [s.v.kliuchnyk@ust.edu.ua](mailto:s.v.kliuchnyk@ust.edu.ua), ORCID 0000-0001-7771-8377

## Methodology for Determining the Effective Parameters of Concrete-Filled Steel Tube Beam Trusses with Top-Deck Traffic

**Purpose.** This article presents a methodology for determining the effective dimensions of main beam trusses with triangular lattices and top-deck traffic arrangement using concrete-filled steel tubes. The aim of the study is to develop an algorithm that enables identification of optimal geometric and structural parameters of such trusses based on comprehensive consideration of material properties, loads, and structural element behavior. **Methodology.** The research is based on numerical modeling using Mathcad and LIRA–CAD software packages. Within its framework, a uniform search method is implemented, which ensures the generation of all possible combinations of truss parameters, their analysis, and filtering according to efficiency criteria. Special emphasis is placed on the upper chord of the trusses, made of concrete-filled steel tubes, which allows for maximum utilization of the load-bearing capacity of these elements. The calculations incorporate standard Ukrainian loads (AK, NK, CK), and verification of the operating conditions of concrete-filled steel tube elements is performed in accordance with Eurocode 4 provisions. **Results.** The developed algorithm facilitates automatic generation, verification, and filtering of variants considering load-bearing capacity limits. The validation of calculation results confirmed their compliance with regulatory requirements and effective material use. The average computation time per variant is sufficient for determining efficient concrete-filled steel tube cross-sections but is not a limiting factor and indicates potential for further optimization and acceleration of the algorithm. **Originality.** The authors propose a methodology for searching optimal parameters of segmented concrete-filled steel tube beam trusses with triangular lattices and top-deck traffic layout. For the first time, a detailed multi-level calculation structure of concrete-filled steel tube trusses under regulatory loads according to Ukrainian codes (DBN) is introduced, with element design carried out in

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

accordance with Eurocodes. **Practical value.** The study develops an adaptive tool aimed at optimizing concrete-filled steel tube truss structures in bridge engineering. The proposed approach contributes to reducing material consumption and ensures rational use of concrete-filled steel tubes in the elements of main beam trusses.

**Keywords:** concrete-filled steel tube; composite reinforced concrete beam truss; uniform search method; effective parameters; parametric analysis

## REFERENCES

1. Balabuh, Ya. (2010). Efficiency of steel-reinforced road bridges. *Roads and Bridges*, 12, 16-23. (in Ukrainian)
2. Gorodetskiy, A. S., Yevzerov, I. D., Melnikov, S. L., & Meksimenko, V. P. (1997). *Programniy kompleks «LIRA-Windows»*. Kiiv: NDIASB (in Russian)
3. Gulaga, B. I., & Lobach, R. B. (2021, April). Mozhlyvist vykorystannya strukturnyx konstrukcij dlya progonovyx budov avtodorozhnik mostiv. In *Sekciya «Mosty, konstrukciyi ta budivel`na mexanika» Zbirnyk naukovyx prac 83-yi mizhnarodnoyi studentskoyi naukovoyi konferenciyi* (pp. 106-119). XNADU. Kharkiv. (in Ukrainian)
4. *Yevrokod 4. Proektuvannia stalezalizobetonnykh konstruksii. Chastyna 2. Zahalni pravyla i pravyla dlia mostiv (EN 1994-2:2005, IDT). 120 DSTU-N B EN 1994-2:2012.* (2013). Kyiv. (in Ukrainian)
5. Korniiiev, M. M. (2018). *Stalevi mosty: Teoretychnyi i praktychnyi posibnyk z proektuvannia* (Vols. 1-3). (Vol. 3). Kyiv: Vyd-vo «Ultradruk». (in Ukrainian)
6. Radkevych, A. V., Lisniak, M. O., Horbatiuk, Yu. M., & Lykhopiok, P. A. (2018). *Vidnovlennia shtuchnykh budov*. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
7. Spivak, D. S., & Kliuchnyk, S. V. (2025). Influence of Materials and Scale Factor on Failure of K-shaped Nodes of Pipe Concrete Bridges: Effectiveness of Design Parameters. *Science and Transport Progress*, 1(109), 152-169. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/324909> (in Ukrainian)
8. Spivak, D. S., & Kliuchnyk, S. V. (2024). Critical Analysis of the Development of the Design of Lattice Tube Concrete Bridges with a Ride on Top. *Science and Transport Progress*, 1(105), 105-112. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/301524> (in Ukrainian)
9. Albareda-Valls, A., Maristany Carreras, J., Calderón Valdiviezo, L., & Muñoz Blanc, C. (2019). Implementación del efecto de pandeo en el método simplificado del ec4-1-1 para secciones tubulares mixtas. *Hormigón y Acero*, 70(288), 21-33. DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2019.001> (in English)
10. Cho, J., Moon, J., Ko, H.-J., & Lee, H.-E. (2018). Flexural strength evaluation of concrete-filled steel tube (CFST) composite girder. *Journal of Constructional Steel Research*, 151, 12-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.08.038> (in English)
11. Ganhaizi Bridge. *HighestBridges.com*. Retrieved from [https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Ganhaizi\\_Bridge](https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Ganhaizi_Bridge) (in English)
12. Ketema, E., & Taye, S. (2006). Design chart procedures for polygonal concrete-filled steel columns under uniaxial bending. *SINET: Ethiopian Journal of Science*, 29(1), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.4314/sinet.v29i1.18255> (in English)
13. Long, Y.-L., Zeng, L., Gardner, L., & Wadee, M. A. (2022). A new model for calculating the elastic local buckling stress of steel plates in square CFST columns. *Thin-Walled Structures*, 171, 108756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108756> (in English)
14. Pu, B., Zhou, X., Liu, Y., Liu, B., & Jiang, L. (2021). Mechanical behavior of concrete-filled rectangular steel tubular composite truss bridge in the negative moment region. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(5), 795-814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.09.002> (in English)
15. Schnabl, S., Jelenić, G., & Planinc, I. (2015). Analytical buckling of slender circular concrete-filled steel tubular columns with compliant interfaces. *Journal of Constructional Steel Research*, 115, 252-262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.035> (in English)
16. 好消息！你们去川藏北线看红叶的路上，汶马高速这座桥合龙\_澎湃号·政务\_澎湃新闻. Retrieved from [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_2597829](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_2597829) (in Chinese)

Надійшла до редколегії: 10.02.2025

Прийнята до друку: 13.06.2025

**АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ****А. В. ЗУБКО, В. І. ЩЕКА**

Урахування верхньої межі похибки вимірювального комплексу під час аналізу оцифрованих сигналів ..... 5

**Н. В. МАЛОВІЧКО**

Розробка методики пошуку відмов в електричній централізації з використанням орієнтованих дерев ..... 13

**ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА****О. А. БУБНОВА, В. А. МІРОШНИК, Р. В. МАРКУЛЬ, П. Б. МАШИХІНА, Л. Г. ТАТАРКО**

Математичне моделювання фільтрації та геоміграції в умовах техногенного навантаження ..... 21

**О. О. МЕДВЕДЕВА, С. В. ДЗЮБА, М. М. БЛЯЄВ, В. А. КОЗАЧИНА, П. С. КІРІЧЕНКО**

Прогнозування зон забруднення атмосферного повітря від полігонів твердих побутових відходів ..... 29

**В. Є. ОЛШЕВСЬКА, Г. С. ОЛШЕВСЬКИЙ, Г. П. ІВАНОВА**

Акумуляторні батареї електромобілів: технічні та екологічні аспекти ..... 35

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ****Е. К. МАНАФОВ, Х. Б. ГУЛІЄВ, Ф. Г. ГУСЕЙНОВ**

Оцінка технічного стану тягових двигунів у реальному часі за допомогою технологій машинного навчання та IoT ..... 50

**А. М. МУХА, С. В. ПЛАКСІН, Д. В. УСТИМЕНКО, Ю. В. ШКІЛЬ, О. В. КІТАЄВ, А. П. АНТОНЮК**

Аналіз передумов до створення дворезимного тягово-левітаційного модуля другого покоління ..... 65

**ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ****Б. Є. БОДНАР, О. Б. ОЧКАСОВ, Є. Б. БОДНАР**

Комплексне діагностування тепловозів з гідروпередачею: підходи та методи ..... 76

**Д. М. КОЗАЧЕНКО, О. В. КЛИГА, Є. В. ХАРЧЕНКО**

Моделювання складів поїздів у задачах техніко-експлуатаційної оцінки залізничних станцій ..... 88

**МАШИНОБУДУВАННЯ****Р. П. ПОГРЕБНЯК**

Раціональний структурний синтез схем кривошипно-повзункових механізмів захоплювальних пристроїв ..... 98

**ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ****М. Б. КУРГАН, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ, Р. В. ІВАНОВ, А. М. КУРГАН**

Оцінка економічних втрат автотранспорту від непродуктивних простоїв на залізничних переїздах ..... 107

**РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ****С. В. ПАНЧЕНКО, А. О. ЛОВСЬКА, М. В. ПАВЛЮЧЕНКОВ, П. В. РУКАВІШНИКОВ, Д. Г. ПЕТРЕНКО, М. Г. РАВЛЮК**

Експериментальне дослідження міцності кришки люка підвагона під час перевезення в ньому контейнерів ..... 119

**ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО****А. В. РАДКЕВИЧ, Д. О. БАННИКОВ, ДЖ. К. МА, Ю. З. ЛІ**

Сучасні конструкції аркових несних систем громадських будівель ..... 128

**А. В. РАДКЕВИЧ, Д. О. БАННИКОВ, Ш. П. ЧЕН, С. Ф. ФУ**

Особливості сучасного проектування сталевих підкранових балок виробничих будівель ..... 140

**К. М. ПЕРЕПЕЛИЦЯ, С. В. КЛЮЧНИК**

Дослідження елементів понтонного мосту з огляду на сучасні виклики щодо вантажопідйомності ..... 154

**О. Л. ТЮТЬКІН, Д. О. БОСИЙ, О. І. САБЛІН, Н. К. БОНДАРЕНКО**

Оцінка вибухового впливу та методика виявлення безпілотних літальних апаратів для захисту вестибюлю метрополітену ..... 165

**Д. С. СПІВАК, С. В. КЛЮЧНИК**

Методика визначення ефективних параметрів трубобетонних балкових ферм з їздою зверху ..... 176

## CONTENTS

### ***AUTOMATED AND TELEMATIC SYSTEMS ON TRANSPORT***

- A. V. ZUBKO, V. I. SHCHEKA**  
Consideration of the Upper Error Bound of Measurement  
Complex in the Analysis of Digitized Signals ..... 5
- N. V. MALOVICHKO**  
Development of a Methodology for Fault Detection in  
Electrical Centralization Using Oriented Trees ..... 13

### ***ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY***

- O. A. BUBNOVA, V. A. MIROSHNYK, R. V. MARKUL,  
P. B. MASHYKHINA, L. H. TATARKO**  
Mathematical Modeling of Filtration and Geomigration Under  
Conditions of Anthropogenic Load ..... 21
- O. O. MEDVEDIEVA, S. V. DZIUBA, M. M. BILIAIEV,  
V. A. KOZACHYNA, P. S. KIRICHENKO**  
Forecasting Zones of Air Pollution from Solid Waste Landfills  
..... 29
- V. E. OLISHEVSKA, H. S. OLISHEVSKYI,  
H. P. IVANOVA**  
Electric Vehicle Batteries: Technical and Environmental  
Aspects ..... 35

### ***ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES***

- E. K. MANAFOV, H. B. GULIYEV, F. H. HUSEYNOV**  
Real-Time Assessment of the Technical Condition of Traction  
Motors Using Machine Learning and IoT Technologies ..... 50
- A. M. MUKHA, S. V. PLAKSIN, D. V. USTYMENKO,  
YU. V. SHKIL, O. V. KITAYEV, A. P. ANTONIUK**  
Analysis of Prerequisites for the Creation of a Second-  
Generation Dual-Mode Traction-Levitation Module ..... 65

### ***OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS***

- B. Y. BODNAR, O. B. OCHKASOV, Y. B. BODNAR**  
Comprehensive Diagnostics of Diesel Locomotives with  
Hydraulic Transmission: Approaches and Methods ..... 76
- D. M. KOZACHENKO, O. V. KLYGA,  
YE. V. KHARCHENKO**  
Modeling of Train Sets in Tasks of Railway Stations  
Technical and Operational Evaluation ..... 88

### ***MECHANICAL ENGINEERING***

- R. P. POHREBNIAK**  
Rational Structural Synthesis of Schemes of Crank-Slider  
Mechanisms of Gripping Devices ..... 98

### ***RAILROAD AND ROADWAY NETWORK***

- M. B. KURHAN, O. F. LUZHYTSKYI, R. V. IVANOV,  
A. M. KURHAN**  
Assessment of Economic Losses of Road Transport Due  
to Unproductive Downtime at Railway Crossings ..... 107

### ***ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION***

- S. V. PANCHENKO, A. O. LOVSKA,  
M. V. PAVLIUCHENKOV, P. V. RUKAVISHNYKOV,  
D. H. PETRENKO, M. H. RAVLYUK**  
Experimental Research of the Strength of an Open Wagon  
Hatch Cover during the Transportation  
of Containers in it ..... 119

### ***TRANSPORT CONSTRUCTION***

- A. V. RADKEVYCH, D. O. BANNIKOV, J. C. MA,  
S. W. LIU**  
Modern Designs of Arch Load-Bearing Systems of Public  
Buildings ..... 128
- A. V. RADKEVYCH, D. O. BANNIKOV, S. P. CHEN,  
X. F. FU**  
Features of Modern Design of Steel Crane Beams  
for Industrial Buildings ..... 140
- K. M. PEREPELYTSIA, S. V. KLIUCHNYK**  
Research of Pontoon Bridge Elements in View of Modern  
Challenges in Terms of Load Capacity ..... 154
- O. L. TIUTKIN, D. O. BOSYL, O. I. SABLIN,  
N. K. BONDARENKO**  
Assessment of Explosive Impact and Methods for Detecting  
Unmanned Aerial Vehicles During Protection of the Metro  
Vestibule ..... 165
- D. S. SPIVAK, S. V. KLIUCHNYK**  
Methodology for Determining the Effective Parameters of  
Concrete-Filled Steel Tube Beam Trusses with Top-Deck  
Traffic ..... 176

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

### Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

### Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

**Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є:** наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

### Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

### З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Наукова бібліотека (ауд. 166),  
Український державний університет науки і технологій,  
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,  
49010  
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.ust.edu.ua/>

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.**

№ 2 (110) 2025

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова  
Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова  
Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 22,55. Тираж 100 пр. Зам. №02/02

**Український державний університет науки і технологій**

*Адреса редакції, видавця:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* stp.journal@ust.edu.ua

*Друк:*

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.**

=

**SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS**

No. 2 (110) 2025

(in Ukrainian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova  
Desktop publishing – O. V. Pominova  
Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 22,55. Circulation 100. Order no. 02/02

**Ukrainian State University of Science and Technologies**

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r.267, Dnipro, 49010, Ukraine

*Tel.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* stp.journal@ust.edu.ua

*Printing*

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

