

Науковий збірник



**Центральноукраїнський
науковий вісник
Технічні науки**

**Central Ukrainian Scientific Bulletin
Technical Sciences**

Випуск 11 (42)

Частина II

**Кропивницький
2025**

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

За загальною редакцією М.І. Черновола

Заснований у 1997 році

**В и п у с к 11(42)
Частина II**

Кропивницький • 2025

ISSN 2664-262X

Ministry of Education and Science of Ukraine
Central Ukrainian National Technical University

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.
TECHNICAL SCIENCES**

Under the general editorship of M. Chernovol

Founded in 1997

**Issue 11(42)
Part II**

Kropyvnytskyi • 2025

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки і транспортних засобів, технології виробництва, транспортних технологій та логістики, будівництва, матеріалознавства, IT-технологій, роботизації, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації до використання результатів досліджень у галузях народного господарства.

Науковий вісник є фаховим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень професорсько-викладацького складу, аспірантів, докторантів університету, а також науковців інших навчальних закладів, науково-дослідних інститутів НАНУ та промислових підприємств України.

Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ЗВО, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 26 травня 2025 року № 9.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Михайло ЧЕРНОВІЛ

Редакційна колегія: Віктор АУЛІН, д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Сергій ЛИСЕНКО, канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Олексій СМІРНОВ, д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Олександр ДОРЕНСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Андрій БАБІЙ, д-р техн. наук, проф.; Ірина БЕРЕЗЮК, канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Niger); Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, проф.; Лариса ВІХРОВА, канд. техн. наук, проф.; Андрій ГАЛКІН, д-р техн. наук, проф.; Володимир ГАМАЛІЙ, д-р ф.-м. наук, проф.; Антон ГАСЕНКО, канд. техн. наук, доц.; Дмитро ГОЛУБ, канд. техн. наук, доц.; Андрій ГРИНЬКІВ, канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Віктор ДАРИЄНКО, канд. техн. наук, доц.; Олександр ДІДИК, канд. техн. наук, доц.; Микола ЗОЦЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Вячеслав ІВАЩУК, д-р техн. наук, доц.; Сергій КАРПУШИН, канд. техн. наук, доц.; Андрій КИРИЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Василь КЛИМЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Олександр КОВАЛЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Тетяна КОРЕНЬКОВА, д-р техн. наук, доц.; Олександр КУЗИК, канд. техн. наук, доц.; Василь МАТЕЙЧИК, д-р техн. наук, проф.; Анатолій МАЦУЙ, д-р техн. наук, проф.; Єлизавета МЕЛЕШКО, д-р техн. наук, проф.; Сергій ОСАДЧИЙ, д-р техн. наук, проф.; Віктор ПАШИНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; Микола ПАШИНСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.; Петро ПЛІШКОВ, канд. техн. наук, проф.; Олександр РОССОЛОВ, д-р техн. наук, доц.; Сергій РУБАН, канд. техн. наук, доц.; Василь САЛЮ, д-р техн. наук, проф.; Сергій СМІРНОВ, канд. техн. наук, доц.; Михайло СТОРЧАК, д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Людмила ТАРАНДУШКА, д-р техн. наук, проф.; Геннадій ФІЛІМОНІХІН, д-р техн. наук, проф.; Ігор ШЕПЕЛЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Володимир ЯЦУН, д-р техн. наук, доц.

Експерти – літературні редактори: Валерій МИЦЕНКО, канд. пед. наук, доц. (англійська мова); Тетяна БАБИЧ, канд. філол. наук, доц. (українська мова).

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8, Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522) 390-472, +380 (522) 390-437, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://mapiea.kntu.kr.ua/>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Науковий вісник заснований у 1997 році.

Включений до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (доктора філософії) в галузі технічних наук (постанови Президії ВАК України від 9 червня 1999 року №1-05/7, від 14 жовтня 2009 року № 1-05/4; накази Міністерства освіти і науки України від 29 грудня 2014 року № 1528, від 07 листопада 2018 року № 1218, від 02 липня 2020 року № 886, від 24 вересня 2020 року № 1188).

Науковий вісник зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus*, *CrossRef*, *Open Ukrainian Citation Index*, *WorldCat*, *ResearchBib*, *Google Scholar*

Ідентифікатор media: R30-03350 (рішення Нацради України з питань ТБ і РМ від 25.04.2024 р. № 1418).

ISSN 2664-262X (p), 2707-9449 (o)

DOI: 10.32515/2664-262X

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

UDC 004.9:336.76

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.3-10](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.3-10)**Oleksandr Korniienko¹, Nataliia Kozub¹**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,**Oleksandr Dorenskyi²**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.¹*Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine*²*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine**e-mail: actinis1@gmail.com, aleksandr Kornienko19992106@gmail.com, dorenskyiop@kntu.kr.ua*

Method and Technological Solution of an AI-Based Adaptive Investor Survey Service for Determining an Individual Risk Profile

An adaptive investor survey model employing advanced machine learning is presented to generate a continuous risk profile. Using conditional logic, weighting coefficients, and a continuous risk scale, it overcomes traditional questionnaire limitations to enhance accuracy and personalization. The system built on React, Node.js/NestJS, and Python/FastAPI efficiently processes responses and delivers tailored investment recommendations. The research also includes the results of a comparative analysis, a description of the data transformation methodology, and a secure data transfer scheme, confirming the practical effectiveness of the proposed solutions. The developed method, model, and technological solution of the AI-driven adaptive survey service enhance the accuracy and personalization of risk profiling.

digital transformation, machine learning, adaptive polling, investor risk profile, conditional logic, continuous risk scale, personalized recommendations

Problem Statement and its Relevance. The modern financial market is characterized by high volatility, significant uncertainty, and a diverse array of financial instruments. These conditions pose a critical challenge for investors who must accurately assess their risk tolerance to develop effective and reliable investment strategies. This issue is particularly relevant in today's complex market environment and is further compounded by the low level of financial literacy observed in regions such as Ukraine.

Analysis of Recent Research and Existing Approaches. Traditional risk assessment methods – typically based on standardized questionnaires and discrete risk scales – have been widely used by financial advisors and institutions. However, extensive research has demonstrated that these approaches often fail to capture the nuanced and individualized risk profiles of investors. Limitations such as inflexibility, redundant questioning, and the inability to address psychological and behavioral factors have led to suboptimal investment recommendations.

Objective of the Research. This study aims to develop an adaptive investor survey model that leverages advanced machine learning techniques to generate a detailed, continuous risk profile. By incorporating conditional logic, expert-determined weighting coefficients, and a continuous risk scale, the proposed model seeks to enhance both the accuracy and personalization of investment recommendations.

Presentation of the Main Material. The contemporary financial market is characterized by high volatility, significant uncertainty, and a diverse array of financial instruments [1]. In such an environment, a critical challenge for investors is the accurate assessment of their risk tolerance – a fundamental prerequisite for developing effective and reliable investment

reliable investment strategies [2]. Traditional methods for determining risk profiles typically rely on static questionnaires and simple categorical scales (e.g., conservative, balanced, aggressive), which often fail to capture the unique characteristics of individual investors and therefore provide imprecise estimates of their true risk capacity [3]. As a result, particularly for those without specialized financial expertise, selecting an optimal portfolio can be challenging, sometimes leading to losses or suboptimal investment outcomes. This problem is further exacerbated by the generally low level of financial literacy in Ukraine; research indicates that many Ukrainian citizens lack the necessary skills and knowledge for effective personal financial management, diminishing their ability to make sound financial decisions [4]. Consequently, there is a pressing need for accessible, comprehensible, and adaptive solutions that allow novice investors to accurately assess their risk profiles and obtain high-quality portfolio recommendations. The aim of this study is to develop an adaptive investor survey model using machine learning techniques to generate a detailed, continuous risk profile for users. Such a model is expected to improve both the level of accuracy and personalization of investment recommendations, making the investment process clearer and more accessible to a wider segment of the Ukrainian population.

Analysis of Existing Approaches to Determining Investor Risk Profile. Traditional methods for assessing an investor's risk profile are predominantly based on standardized questionnaires widely employed by financial advisors, investment firms, and banks. Typically, these questionnaires consist of a predetermined set of questions with fixed response options that correspond to specific risk categories (e.g., conservative, balanced, aggressive). Their main advantage lies in their simplicity and ease of use for individuals without specialized training. However, such approaches exhibit several significant limitations that can negatively affect the quality of subsequent investment decisions. One primary shortcoming is the reliance on discrete risk scales, which use clear but limited categories that do not flexibly capture the unique characteristics of each investor. This rigidity can lead to inaccuracies in determining an investor's true risk level, thereby compromising the effectiveness of the recommended investment strategies [5]. Moreover, traditional questionnaires lack adaptability; questions are presented in a fixed sequence regardless of the respondent's previous answers. As a result, the survey may include numerous irrelevant or redundant questions, reducing both its efficiency and the respondent's comfort, ultimately compromising data quality. Such issues can further diminish the quality of the data collected due to fatigue or inattentiveness during lengthy surveys [6]. Additionally, conventional questionnaires often fail to account for the psychological and behavioral dimensions of financial decision-making. Investors may exhibit complex and ambiguous attitudes toward risk that cannot be adequately captured by a few simple categories, leading to imprecise risk assessments and, consequently, inaccurate investment recommendations [7, 8]. Another significant limitation is the lack of personalization in the investment recommendations derived from these surveys. Because traditional questionnaires do not incorporate many individual factors – such as financial literacy, investment experience, or specific economic contexts – the resulting risk profiles are often superficial and offer limited practical value. This issue is particularly pronounced in the Ukrainian market, where many investors, especially novices, struggle with low financial literacy and limited access to quality financial advice. As a result, conventional risk assessment methods, which are generally oriented toward Western markets, may not be well-suited for the Ukrainian context. In light of these limitations, there is a clear need to transition to adaptive risk assessment methods that dynamically tailor the survey process to each respondent. By reducing the number of irrelevant questions and enhancing data quality, such adaptive methods can more accurately capture an investor's risk profile. Modern artificial intelligence and machine learning techniques enable the development of models that simultaneously consider numerous parameters,

uncover latent patterns in the responses, and provide a more precise, continuous evaluation of risk. In addition, today there is a trend of digital transformation of business processes in all areas of activity [16, 17]. Thus, an analysis of existing traditional approaches reveals significant shortcomings, underscoring the necessity for contemporary adaptive methods that utilize machine learning to generate individualized investment recommendations.

Theoretical Aspects of the Adaptive Questionnaire for Determining Investor Risk Profile. Adaptive questionnaires represent an innovative approach in the field of survey research, significantly enhancing the quality and relevance of the data compared to traditional methods [10]. The primary advantage of an adaptive survey lies in its ability to modify the questions presented to respondents based on their previous answers, thereby tailoring the process to be more personalized and focused. This dynamic adaptation is implemented using conditional logic, which governs the system whereby subsequent questions are either displayed or skipped according to predefined rules. For instance, if a respondent indicates a low level of financial literacy, the system automatically triggers additional follow-up questions designed to more precisely gauge their financial experience and risk perception. This conditional logic can be structured as an algorithmic decision tree or a sequence of rules, both of which contribute to the flexibility and interactivity of the survey process. Another critical component of adaptive surveys is the use of weighting coefficients. These coefficients assign varying degrees of importance to different questions based on their contribution to the overall risk profile estimation. Consequently, questions that are deemed more critical for the final risk assessment are given higher weights, which in turn allows for a more precise evaluation of the investor's true financial situation. In addition, the proposed system utilizes a continuous risk scale rather than a traditional discrete one. Unlike discrete scales, a continuous risk scale enables a more detailed and nuanced analysis of an investor's risk attitude by expressing their profile as a numerical value within a specified range (for example, between 0 and 1). This continuous approach facilitates a more flexible alignment of investment recommendations with each investor's individual financial needs and risk tolerance. The appropriate determination of weighting coefficients has a significant impact on the accuracy of the risk profile estimation. Proper calibration ensures that the relative importance of various behavioral and experiential factors is accurately reflected in the final assessment. Therefore, incorporating weighting coefficients into the adaptive survey process substantially enhances the precision of the results, thereby enabling more effective and reliable personalization of investment recommendations. In summary, the application of adaptive survey techniques, conditional logic, continuous risk scaling, and weighting coefficients opens new avenues for achieving higher accuracy, deeper personalization, and increased efficiency in the determination of an investor's risk profile.

Selection of Machine Learning Methods for Risk Assessment. Modern machine learning techniques are increasingly applied to risk assessment tasks, resulting in substantial improvements in both accuracy and quality over traditional approaches [11]. Among the most commonly used algorithms for determining an investor's risk profile are neural networks, support vector machines (SVM), decision trees, and random forests. Neural networks are powerful tools capable of modeling complex nonlinear relationships; however, they require extensive datasets for training, are challenging to fine-tune, and demand significant computational resources. In contrast, support vector machines are effective for classification and regression tasks, particularly when dealing with smaller datasets, though they may be less efficient in high-dimensional settings or when interpretability is critical. Decision trees offer the advantages of straightforward interpretability and ease of implementation, but they are susceptible to overfitting and can be unstable in response to minor fluctuations in training data. Random forests, an ensemble learning method, combine the strengths of decision trees with additional mechanisms to enhance predictive accuracy. This approach involves

constructing numerous independent decision trees – each trained on random subsets of the data and features – with the final prediction derived from the aggregated outputs of these trees. For this study, the RandomForestRegressor algorithm was chosen [9] due to its robustness to missing values; random forest models can effectively process datasets that include incomplete responses, thereby simplifying the data preprocessing stage. Moreover, considering that the adaptive survey may dynamically omit certain questions based on a respondent's input, random forests offer reliable risk prediction without requiring excessive computational resources. Their high predictive accuracy and ease of integration into modern technology stacks – such as Python (FastAPI) and Node.js (NestJS) – make them ideally suited for rapid deployment in practical applications.

Concept of the Developed Adaptive Survey Model. The proposed adaptive survey model is designed to serve as a flexible and interactive tool that accurately determines an investor's risk profile. Types of Questions:

- Numerical - respondents are required to enter a numeric value (e.g., the percentage of funds they are willing to invest, the investment horizon in years, etc.).
- Scale-Based - these questions ask respondents to evaluate certain aspects on a numerical scale (for example, rating their risk tolerance on a scale from 1 to 5).
- Multiple-Choice Questions - respondents select one or more options, which capture distinct behavioral traits or investment experiences.

Adaptive Question Selection Logic. Each question in the survey is accompanied by a condition field that determines whether it should be displayed to the respondent [13]. These conditions are formulated based on the respondent's previous answers. For instance, if a response indicates a low level of financial literacy, the system automatically triggers a subsequent question (identified by a lower question ID) aimed at further detailing the respondent's risk attitude or experience with financial instruments. The underlying algorithm is illustrated in Figure 1.

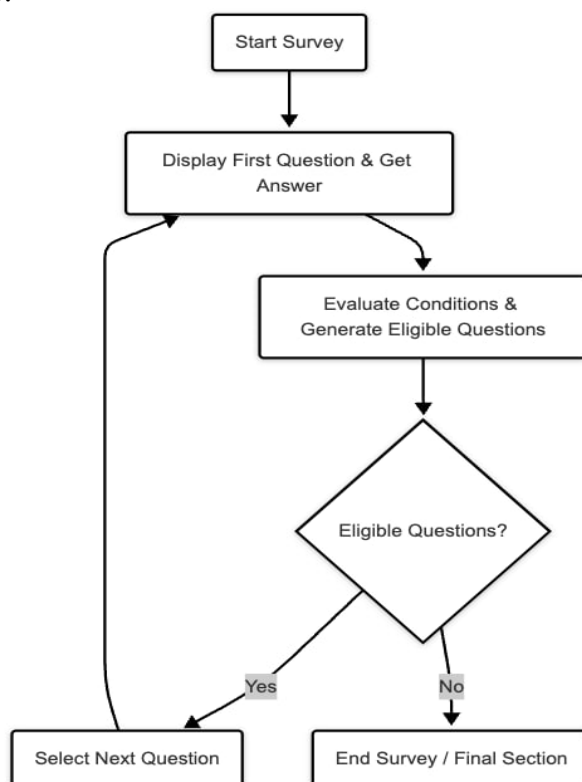


Figure 1 – Flowchart of the algorithm for selecting the next question

Source: developed by the authors.

Table 1 – Example of Precise User Segmentation Based on Multiple Criteria

Question ID	Question	Answer Options	Selection Criteria
1	Do you have any experience investing in the stock market?	- None - Less than 1 year - 1–3 years - More than 3 years	If "None" is selected, trigger a follow-up question to assess basic knowledge (Q2); if any experience is indicated, proceed to further detailed questions (Q3–Q4).
2	What is your level of knowledge regarding financial instruments (stocks, bonds, ETFs)?	- Beginner - Intermediate - Advanced	If "Beginner" is selected, activate a question addressing the need for additional education; otherwise, proceed to subsequent clarifying questions.
3	How would you rate your understanding of the stock market?	- Limited (unfamiliar with key terms) - Moderate (familiar with basic concepts) - Deep (analyzes trends)	If "Limited" is selected, trigger questions related to training and consultation; if "Deep" is selected, activate questions to assess decision-making during market fluctuations.
4	Have you experienced significant financial losses in previous investments?	- Never - Rarely - Often	If "Often" is selected, activate additional questions on risk management strategies; if "Never" or "Rarely" is selected, skip this section and move to the concluding part.

Note: This table is provided as a representative example to facilitate precise segmentation of respondents across multiple criteria, thereby ensuring a comprehensive assessment of their profiles.

Source: developed by the authors.

Such an approach optimizes survey duration, enhances the accuracy of the collected data, and ultimately improves the overall user experience.

Conversion of Responses into a Numerical Format. A crucial step in the survey process is the transformation of collected responses into a numerical vector that serves as input for training machine learning models [12]. This process involves normalizing various types of responses so that they are mapped onto a uniform range – for instance, scale-based answers might be normalized to values between 0 and 1, while percentage-based responses are similarly scaled to the [0, 1] interval. In addition, expert-determined weighting coefficients are applied based on the relative importance of each question in determining the overall risk profile. This approach ensures that the final numerical vector maintains a consistent dimensionality, even if certain questions are omitted due to the adaptive logic of the survey; any missing responses are filled in with default values or designated markers.

Data Preparation for Model Training. The data preparation phase involves constructing a cohesive dataset consisting of paired "response vector – risk rating" entries. For initial model training, expert assessments are used to generate a synthetic yet realistic dataset, which facilitates the derivation of reliable risk predictions during the early stages of system deployment. The preprocessed data is then utilized to train a RandomForestRegressor model, which is chosen for its high accuracy and robustness in risk prediction. In subsequent phases, the synthetic dataset may be replaced with a fully expert-curated dataset to further enhance precision and monitor dynamic changes in risk assessments.

Technological Solutions for System Implementation. To realize the adaptive survey system integrated with machine learning, a modern technology stack was selected for its convenience, efficiency, and ease of integration across various system components.

Formalization of the Adaptive Investor Survey Process for Determining an Individual Risk Profile. Training a classifier requires specifying input and output data. For this task, the classifier input should be a vector of normalized scores corresponding to the survey responses, with a length equal to the number of questions in the survey:

$$\bar{v}_i = \{v_0; v_1; v_2; \dots\}.$$

Accordingly, for the training set, the set of risk profile class is determined by expert assessments:

$$C = [c_0; c_1; c_2; \dots].$$

Based on the specified input and output parameters, the task is to find a mapping function:

$$c_i = F(\bar{v}_i).$$

where F is a classifier that maps the vector of normalized response scores to a corresponding safety class; $c_i \in R$ is a continuous (non-discrete) estimate of the risk level.

To account for the optimized survey, where certain questions may be skipped, the classifier replaces missing responses with an "impossible" score (e.g., -1) with probability $1 - \mu_i$. The value -1 is inserted not only during the training but may also appear during real questionnaire completion if certain questions are skipped due to adaptive logic. The coefficient μ_i represents an expert-defined importance weight for a specific question, as described above. As a result, the training dataset is transformed according to the following algorithm:

1. A set of responses to the full survey $V = [\bar{v}_i]$ is formed through test surveys or based on expert evaluations.
2. Each response in the set is assigned a corresponding safety class $C = [c_0; c_1; c_2; \dots]$. At the same time, the cardinalities of the sets are equal, i.e., $|V| = |C|$, meaning both contain the same number of elements.
3. The set V is expanded to $\{V_e; C_e\}$ by applying a process of simulating question omissions to each element. Depending on the total number of questions, each input vector $\bar{v}_i$ serves as a source for multiple modified versions, generated by randomly excluding responses with probabilities $1 - \mu_i$. Each modified input vector retains the safety class originally assigned by experts.
4. The classifier is trained on the dataset $\{V_e; C_e\}$, where V_e represents the input data, and C_e contains the corresponding class labels indicating the safety class assigned to each response vector.

Front-end: React. React is a powerful JavaScript library for building interactive and adaptive user interfaces. It enables rapid development of dynamic applications with effective state management, making it ideally suited for implementing complex adaptive surveys. The front-end is responsible for dynamically generating and adapting survey questions based on user responses, as well as collecting and transmitting the responses to the back-end.

Back-end: Node.js with NestJS. Node.js combined with the NestJS framework provides high performance, scalability, and seamless integration. Thanks to its support for REST APIs and modular architecture, NestJS efficiently handles data validation, normalization, and the conversion of user responses into a numerical vector before transmitting the data to the machine learning service [15].

ML Service: Python with FastAPI. For the machine learning component, Python paired with FastAPI was chosen due to its rapid service deployment capabilities and high performance [14]. FastAPI supports modern data processing libraries such as Pandas and NumPy and integrates well with popular machine learning frameworks like Scikit-learn. The ML service receives the numerical vector from the back-end, processes it using pre-trained

models, and returns the risk prediction back to the back-end for further use.

Together, these technological solutions form an integrated system that efficiently converts survey responses into a robust numerical format for accurate risk assessment and personalized investment recommendations.

Data transmission scheme. The data transmission process follows the sequence illustrated in Fig. 2.



Figure 2 - Data Transmission Flowchart

Source: developed by the authors.

Explanation:

1. User: The respondent completes the adaptive survey.
2. Front-end (JSON): The front-end formats the survey responses into a JSON request and sends it to the back-end.
3. Back-end (Validation & Normalization): The back-end receives the responses, validates them, normalizes the data, and constructs a numerical vector.
4. REST API: The numerical vector is transmitted via a REST API to the machine learning (ML) service.
5. ML Service (RF): The ML service, utilizing a RandomForestRegressor, processes the data and returns a risk prediction.
6. Recommendations: The predicted risk value is then used to generate personalized investment portfolio recommendations.

Conclusions. The proposed adaptive investor survey model effectively addresses the limitations of traditional risk assessment questionnaires. By utilizing a continuous risk scale and advanced machine learning techniques, the model delivers a more precise and personalized risk profile for investors. The integration of conditional logic and weighting coefficients further refines the survey process, ensuring that investment recommendations are tailored to individual financial needs.

Future Research Directions. Future research should involve experimental testing of the proposed model under real-world conditions, followed by iterative refinements based on user feedback. Additionally, the collection of more extensive real data will be essential for further improving model precision and for adapting to the dynamic nature of financial markets.

List of References

1. Sharpe, W. F. *Investments*. Prentice Hall, 1999. 962 c.
2. Markowitz, H. *Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments*. John Wiley & Sons, 1959. 351 c.
3. Murphy, K. P. *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. MIT Press, 2012. 1104 c.
4. USAID Проєкт «Трансформація фінансового сектору». *Фінансова грамотність, фінансова інклюзія та фінансовий добробут в Україні у 2021 році* [Електронний ресурс]. URL: https://bank.gov.ua/admin_uploads/article/Research_Financial_Literacy_Inclusion_Welfare_2021.pdf (дата звернення: 18.04.2025).
5. Riskalyze. *Risk Number Methodology* [Електронний ресурс]. URL: <https://www.riskalyze.com> (дата звернення: 18.04.2025).
6. Grable, J. E., Lytton, R. H. Financial Risk Tolerance Revisited: The Development of a Risk Assessment Instrument. *Financial Services Review*. 1999. Vol. 8, № 3. С. 163–181.
7. Kahneman, D., Tversky, A. Prospect Theory: An Analysis of Decision Under Risk. *Econometrica*. 1979. Vol. 47, Issue 2. С. 263–291.
8. Lo, A. W. *Adaptive Markets: Financial Evolution at the Speed of Thought*. Princeton University Press, 2017. 504 c.
9. Breiman, L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001. Vol. 45(1). С. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
10. Van der Linden, W. J. *Computerized Adaptive Testing: Theory and Practice*. Springer, 2000. 324 c.
11. Gu, S., Kelly, B., Xiu, D. Empirical Asset Pricing via Machine Learning. *The Review of Financial Studies*. 2020. Vol. 33, Issue 5. С. 2223–2273. DOI: 10.1093/rfs/hhaa009.
12. Hambleton, R. K., Swaminathan, H., Rogers, H. J. *Fundamentals of Item Response Theory*. Sage Publications, 1991. 184 c.
13. Weiss, D. J. *Computerized Adaptive Testing: Theory and Practice*. Springer, 1988. 308 c.
14. Van Rossum, G., Drake, F. L. *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace, 2009. 242 c.
15. Node.js Foundation. *Node.js Documentation* [Електронний ресурс]. URL: <https://nodejs.org/en/docs/> (дата звернення: 18.04.2025).

16. Dorenskyi, O., Drobko, O., Drieiev, O. Improved Model and Software of the Digital Information Service of the Municipal Health Care Institutions. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч. 2. С. 3–10. DOI: 10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.3-10.
17. Kachurivskyi, V., Kotovskyi, A., Lykhodid, T., Kachurivska, H., Dorenskyi, O. The Concept of Digital Transformation of Monitoring Scientific Activity of Participants in Educational Process of the Ukrainian HEI. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 1. С. 27–36. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.27-36.

References

1. Sharpe, W. F. (1999). *Investments*. Prentice Hall.
2. Markowitz, H. (1959). *Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments*. John Wiley & Sons.
3. Murphy, K. P. (2012). *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. MIT Press.
4. USAID Financial Sector Transformation Project. (2021). *Financial literacy, financial inclusion, and financial well-being in Ukraine (2021)*. Retrieved April 18, 2025, from https://bank.gov.ua/admin_uploads/article/Research_Financial_Literacy_Inclusion_Welfare_2021.pdf
5. Riskalyze. (n.d.). *Risk number methodology*. Retrieved April 18, 2025, from <https://www.riskalyze.com>
6. Grable, J. E., & Lytton, R. H. (1999). Financial risk tolerance revisited: The development of a risk assessment instrument. *Financial Services Review*, 8(3), 163–181.
7. Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47(2), 263–291. <https://doi.org/10.2307/1914185>
8. Lo, A. W. (2017). *Adaptive Markets: Financial Evolution at the Speed of Thought*. Princeton University Press.
9. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
10. van der Linden, W. J. (2000). *Computerized Adaptive Testing: Theory and Practice*. Springer.
11. Gu, S., Kelly, B., & Xiu, D. (2020). Empirical asset pricing via machine learning. *The Review of Financial Studies*, 33(5), 2223–2273. <https://doi.org/10.1093/rfs/hhaa009>
12. Hambleton, R. K., Swaminathan, H., & Rogers, H. J. (1991). *Fundamentals of Item Response Theory*. Sage Publications.
13. Weiss, D. J. (1988). *Computerized Adaptive Testing: Theory and Practice*. Springer.
14. Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace.
15. Node.js Foundation. (n.d.). *Node.js Documentation*. Retrieved April 18, 2025, from <https://nodejs.org/en/docs/>
16. Dorenskyi, O., Drobko, O., & Drieiev, O. (2022). Improved model and software of the digital information service of the municipal health care institutions. *Tsentrāl'noukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 5(36), Pt. 2, 3–10. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.3-10](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.3-10)
17. Kachurivskyi, V., Kotovskyi, A., Lykhodid, T., Kachurivska, H., & Dorenskyi, O. (2025). The concept of digital transformation of monitoring scientific activity of participants in educational process of the Ukrainian HEI. *Tsentrāl'noukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), Pt. 1, 27–36. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.27-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.27-36)

О. С. Корнієнко¹, Н. О. Козуб¹, доц., канд. техн. наук, **О. П. Доренський²**, доц., канд. техн. наук

¹Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Метод і технологічне рішення ШІ-сервісу адаптивного опитування інвестора для визначення індивідуального ризик-профілю

Праця присвячена розробці адаптивної моделі опитування інвесторів, яка використовує сучасні методи машинного навчання для формування детального континуального ризикового профілю. Традиційні анкети з оцінки ризику, які гуртуються на статичних і дискретних шкалах, часто не враховують багатовимірність індивідуальної толерантності до ризику, особливо в умовах низького рівня фінансової грамотності. Це дослідження має на меті подолати зазначені обмеження, підвищити точність і рівень персоналізації інвестиційних рекомендацій.

В роботі представлено інноваційну модель адаптивного опитувальника, яка динамічно коригує послідовність запитань за допомогою умовної логіки. Модель адаптує хід опитування на основі попередніх відповідей респондента, що забезпечує релевантність та цілеспрямованість кожного наступного запитання. Завдяки використанню експертно визначених вагових коефіцієнтів і континуальної шкали ризику, суб'єктивні відповіді перетворюються на надійний числовий вектор, придатний для обробки за допомогою алгоритмів машинного навчання. Технічна реалізація моделі ґрунтується на сучасному технологічному стеку, зокрема використовується React для фронтенду, Node.js з NestJS для бекенду, а також Python з FastAPI для сервісу машинного навчання, який застосовує RandomForestRegressor для обробки відповідей і прогнозування рівня ризику. У статті також представлені результати порівняльного аналізу, опису методик трансформації даних та схему безпечної передачі інформації, що підтверджує практичну ефективність запропонованого підходу.

Результати дослідження свідчать, що запропонований метод, модель і ШІ-сервіс адаптивного опитування забезпечують підвищення точності та персоналізацію ризик-профілювання у порівнянні з традиційними методами. Інтеграція адаптивного вибору запитань та сучасних методів машинного навчання оптимізує процес опитування, забезпечує більш надійні інвестиційні рекомендації.

цифрова трансформація, машинне навчання, адаптивне опитування, ризиковий профіль інвестора, умовна логіка, континуальна шкала ризику, персоналізовані рекомендації

Одержано (Received) 18.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 30.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 02.05.2025

М. В. Лохно*Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна
e-mail: valss725@gmail.com*

Контекстуальні характеристики цифрових слідів та їхній вплив на інформаційну безпеку університету

Для галузі управління інформаційною безпекою (ІБ) інформаційно-освітнього середовища університету (ІОСУ) показано, що ефективне використання даних, отриманих шляхом збирання та аналізу різних цифрових слідів (ЦС) користувачів, включно зі студентами, викладачами та співробітниками, можливе для підвищення рівня ІБ і ступеня його захищеності від зовнішніх і внутрішніх загроз. Розроблено концептуальну модель модуля системи підтримки прийняття рішень (СППР), що базується на аналізі ЦС користувачів ІОСУ. Модель враховує як контекстно-залежні, так і контекстно-незалежні характеристики ЦС (відповідно КЗХ, КНХ), що впливають на стан ІБ в ІОСУ. Аналіз ЦС у межах ІОСУ надає фахівцям з ІБ університету можливість не тільки визначати рівні компетентності та відстежувати індивідуальні освітні траєкторії студентів, а й розробляти відповідні керуючі впливи для забезпечення стійкості ІБ. Розглядається використання програмних продуктів, як-от Splunk і ELK Stack (що включає Elasticsearch, Logstash і Kibana), що дають змогу не тільки ефективно аналізувати, а й виявляти потенційні загрози ІБ ІОСУ. Ці інструменти забезпечують університетам високу ефективність в ідентифікації, відстеженні та аналізі проблем, пов'язаних із ЦС користувачів, тим самим сприяючи поліпшенню захисту від несанкціонованого доступу до ресурсів ІОСУ.

інформаційно-освітнє середовище, освітнє середовище університету, інформаційна безпека, цифрові сліди, прийняття рішень

Постановка проблеми. Активне впровадження інформаційних технологій (ІТ) і систем (ІС) у різні сфери життя, зокрема й освітній процес, призводить до часткового або повного перенесення діяльності людини у віртуальне середовище. В освіті ця тенденція особливо яскраво себе проявила під час глобальної пандемії коронавірусу Covid-19, а також в умовах збройної агресії з боку РФ, коли чимало освітніх процесів було перенесено у віртуальне середовище, і практично всі заняття проводили з використанням відповідного програмного забезпечення (ПЗ) – відеоконференції, системи дистанційного навчання, віртуальні лабораторії, класи, які створюють у хмарному середовищі тощо. Таким чином, у сучасному світі, де ІТ та системи стали відігравати домінуючу роль у багатьох процесах, зокрема й у сфері освіти, інформаційно-освітнє середовище університетів (ІОСУУ) стало необхідною умовою реалізації якісного навчального процесу. Під час навчання студенти залишають різноманітні т. зв. цифрові сліди (далі використовуємо абревіатуру – ЦС). Ось лише невеликий перелік таких ЦС, які залишають студенти під час навчання та взаємодій з ІОСУ [1, 2, 3]. Ці ЦС можуть бути корисними студентам, викладачам та університетським адміністраторам для відстеження навчального прогресу, оцінювання робіт, комунікації та аналізу даних. Однак не менш релевантним є і завдання щодо забезпечення конфіденційності та захисту цих ЦС і персональних даних учнів і викладачів, оскільки ЦС у багатьох випадках містять особисту інформацію. Отже, інформація, що міститься в ЦС, може бути об'єктом кібератак або зловживань. В умовах глобалізації університети мають максимально адаптувати свою політику інформаційної безпеки (ІБ) до захисту даних у ЦС, а також інформувати студентів про стратегію закладу освіти щодо захисту даних користувачів, політику його ІБ та конкретні практики захисту їхніх ЦС. Інформаційна безпека ІОСУ являє собою складну

систему, що передбачає захист наявного в закладі освітнього інформаційного простору та унеможливлення пошкодження або викрадення персональних даних усіх учасників навчального процесу, а також інформації, яка має фінансову, освітню, інтелектуальну цінність тощо. Забезпечення ефективного функціонування системи ІБ ІОСУ передбачає витрати певних грошових ресурсів у рамках обраної навчальним закладом стратегії захисту даних. Під час розроблення такої стратегії доцільно врахувати фактори зовнішнього та внутрішнього середовища, оскільки досягнення оптимального результату можливе лише за умови знаходження рівноваги між наявними можливостями та бажаними результатами. А в такій ситуації для менеджменту навчального закладу і персоналу, що відповідає за політику ІБ, може стати затребуваним контекстно-керований підхід до інтелектуальної підтримки прийняття рішень щодо забезпечення ІБ ІОСУ на основі аналізу ЦС користувачів. Усе вищесказане й зумовило інтерес до досліджень у цій галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [4, 5, 6] розглядалися криміналістичні аспекти поняття "доріжка цифрових слідів". Авторами зазначається, що місцем виявлення ЦС можуть бути не тільки матеріальні, а й нематеріальні об'єкти, як-от ресурси мережі Інтернет, профіль особи в соціальній мережі тощо. У [5] показано, що ЦС є значущою комп'ютерною інформацією про події або дії, відображені в матеріальному середовищі, у процесі її виникнення, оброблення, зберігання та передавання. У [6, 7, 8] як приклад ЦС автори розглядали доволі широкий перелік об'єктів - різного роду інформацію, зафіксовану на носіях: дампи оперативної пам'яті; дампи трафіку; ідентифікаційні ознаки, які дають змогу унікально ідентифікувати користувача, телекомунікаційну мережу, кінцеве обладнання (IP-адресу комп'ютера в мережі, MAC-адресу мережевого обладнання, адресу електронної пошти, ідентифікатор соціальної мережі, номер банківської картки, здійснені з неї транзакції, номер телефону, дані систем геолокації тощо). Окремий напрям досліджень пов'язаний із пошуком та аналізом ЦС в інформаційних системах (ІС) університетів, зокрема тих, що відповідають за дистанційну взаємодію студентів і викладачів. У роботах [9, 10] автори зосередили увагу на описовій аналітиці освітнього середовища, використовуючи дані, отримані, зокрема, за допомогою ЦС учнів. У роботах [11, 12] автори розглядають функції ЦС не тільки для контролю індивідуальної освітньої траєкторії студентів, а й як частину системного підходу в процесі оцінювання якості освіти з використанням технології аналізу ЦС. Такий підхід дає змогу аналізувати особисті нахили студентів щодо їхнього професійного зростання [12]. На думку авторів праць [11, 13], у межах освітньої аналітики актуальними є питання з'ясування змісту таких структурних елементів ІОСЗУ, як "цифровий слід", "цифровий портрет студента", "цифровий профіль/паспорт", "маршрут/траєкторія", а також як їхні специфічні характеристики

Однак багато авторів, як наприклад, у роботах [10, 11, 12, 13] зосередили більше уваги на емпіричних дослідженнях, не приділяючи уваги аспектам моделювання процесів, пов'язаних із вивченням впливу ЦС на інформаційну безпеку учнів. Таким чином, актуальним є завдання щодо розвитку моделей інтелектуальної підтримки ухвалення рішень із забезпечення ІБ користувачів ІОСУ на основі аналізу ЦС.

Постановка завдання. Таким чином, метою дослідження є розроблення концептуальної моделі аналітичного модуля для системи підтримки ухвалення рішень з інформаційної безпеки ІОСУ на основі аналізу цифрових слідів користувачів.

Виклад основного матеріалу. Опишемо концептуально інформаційну модель аналітичного модуля ядра системи підтримки прийняття рішень щодо ІБ ІОСУ на основі аналізу ЦС користувачів. Схематично така модель показана на рисунку 1. У

такому поданні можна наочно виокремити зовнішні та внутрішні ресурси ІОСУ. Зовнішніми ресурсами вважатимемо ресурси, які існують поза концептуальною моделлю, що показана на рисунку 1. До таких ресурсів можна віднести, наприклад: профілі користувачів; моделі життєвого циклу користувачів в ІОСУ; методи профілювання користувачів в ІОСУ. Як було зазначено в огляді літератури, більшість робіт у сфері аналізу ЦС студентів в ІОСУ присвячено проблематиці аналізу поведінкової моделі учнів, що, відповідно, передбачає необхідність групування користувачів із подібною поведінкою [3, 4, 5]. При виконанні такого роду аналізу для ухвалення рішень, що стосуються як ІБ, так і формування індивідуальної освітньої траєкторії учнів, розглядаються сегменти користувачів, отримані в результаті поведінкової сегментації користувачів на основі моделей життєвого циклу користувача в ІОСУ.

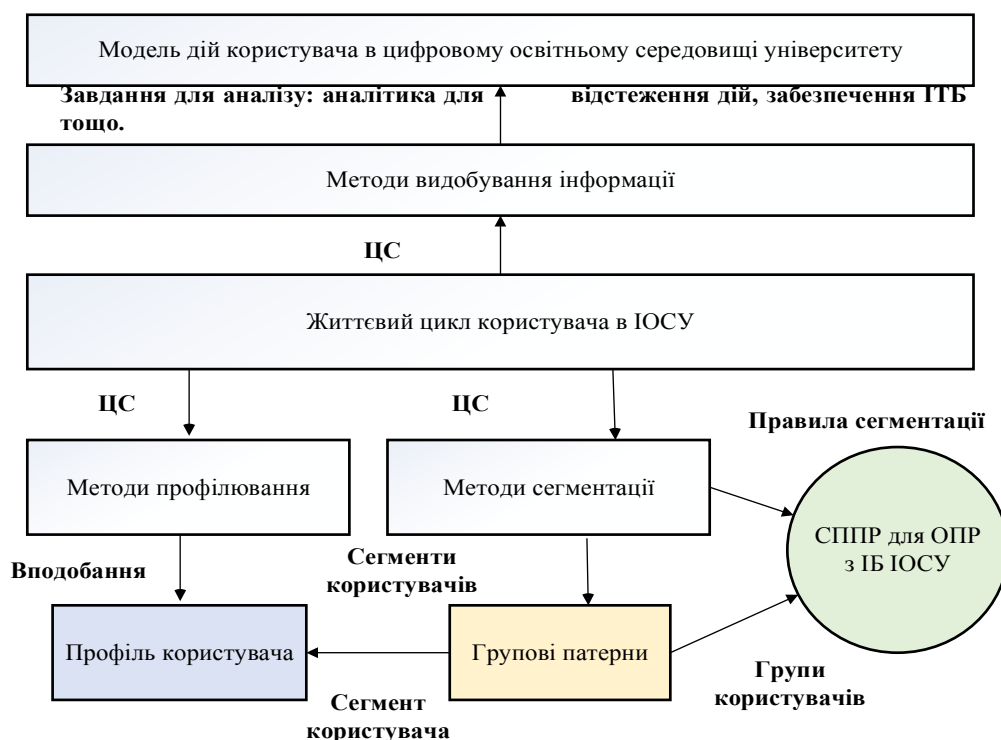


Рисунок 1 – Концептуальна інформаційна модель аналітичного модуля ядра СППР з ІБ ІОСУ на основі аналізу ЦС користувачів

Джерело: розроблено автором

Зауважимо, що ЦС студентів в ІОСУ починають формуватися з моменту їхнього вступу до навчальних закладів. І вже фактично з моменту зарахування міститимуть великий масив даних, починаючи від персональної інформації про студента і закінчуючи даними про проходження студентами всіляких онлайн-курсів. Однак у розрізі нашого дослідження основним завданням було розроблення моделі, що дає змогу вивчати вплив ЦС на ІБ учнів. Якщо розглянути завдання аналізу ЦС в ІОСУ, то вони безпосередньо пов'язані з процесом управління ІБ ІОСУ. Отже, під час вибудовування політики ІБ ІОСУ слід враховувати вимоги до безпеки зберігання, оброблення, синтезу й аналізу даних освітнього контенту та ЦС. Один зі шляхів розв'язання такого завдання полягає в організації безперервного моніторингу ІОСУ, в якій переважно і знаходиться освітній контент. Паралельно вирішується і завдання з управління комунікаціями для формування протоколів обміну даними ЦС, включно з аспектами їхньої ІБ. Наприклад, у системі дистанційного навчання (СДН) у будь-якого

студента є відповідний профіль. Тоді кортеж, що описує такий профіль у найпростішій його інтерпретації, можна представити так:

$$UP = \langle ID\_user, UP\_out, UP\_in \rangle, \quad (1)$$

де UP – профіль користувача; ID_user – унікальне ім'я користувача в ІОСУ, у тому числі в СДН, UP_out, UP_in – відповідно, множини КЗХ і КНХ користувача.

Очевидно, що користувач ІОСУ має як КЗХ, так і КНХ, що впливають на забезпечення його ІБ. До КЗХ можна, наприклад, віднести: рівень технічних знань користувача з питань ІБ. І справді користувачі, зокрема студенти, з більш глибокими пізнаннями в питаннях ІБ, як правило, краще обізнані про ризики та заходи щодо безпечної роботи в мережі. До цієї множини можна віднести і ступінь інформованості користувача про ризики ІБ. Адже глибший рівень інформованості впливає на поведінку користувача і, найчастіше, зумовлює вибір заходів ІБ. Також у цій множині буде присутній і стиль поведінки користувача в мережі університету. Відповідно, більш обережний користувач не стане відкривати небезпечні посилання на зовнішні ресурси або завантажувати ненадійне програмне забезпечення. До КНХ можна зарахувати, наприклад, ідентифікаційні дані користувача; заходи щодо забезпечення фізичної безпеки пристроїв (наприклад, використання сканера відбитків пальців на ноутбукі або смартфоні); своєчасне оновлення ПЗ; застосування стійких паролів; усвідомлення ризиків фішингу та здатність класифікувати підозрілі повідомлення, що можуть бути пов'язані з розголошенням особистої інформації; та ін. Зазначені КЗХ і КНХ, зрозуміло, можуть варіюватися в кожній ІОСУ з урахуванням її особливостей, наприклад, пов'язаних з архітектурою обчислювальної мережі, обраною стратегією забезпечення ІБ та ін. факторів. Для аналізу ЦС фахівці з ІБ використовують різні програмні засоби [14-22]. Один із результатів, одержуваний під час аналізу ЦС в ІОСУ, - це профіль завдань, які вирішував учень. Під профілем завдань в ІОСУ розуміється формалізований опис процесу взаємодії учнів з елементами ІОСУ, наприклад, сайтом системи дистанційного навчання або з інформаційною системою університету. Така взаємодія відбувається під час розв'язання певного завдання. Отже, на підставі профілів завдань у розрізі забезпечення ІБ ІОСУ фахівці із захисту інформації можуть визначати види завдань, у різних ракурсах ІБ, і, наприклад, за допомогою, відстежувати прийняті користувачами рішення. Тоді справедливим є наступний вираз, що описує модель життєвого циклу користувача в ІОСУ (MC), під час розв'язання конкретного завдання:

$$MC = (TP, Type\_P(t_o, t_d), PA, D(t_d), R_1, R_2), \quad (2)$$

де TP – ідентифікатор, який привласнюють завданню певного профілю; $Type\_P(t_o, t_d)$ – тип (вид), розв'язуваної учнем задачі, починаючи з моменту часу (t_o) і до моменту ухвалення рішення (t_d) (наприклад, завантаження виконаної роботи в систему дистанційного навчання); PA – проблемна область для розв'язуваної задачі; $D(t_d)$ – ухвалення рішення в момент часу (t_d); $R_1 \in Type\_P \times PA$, $R_2 \in Type\_P \times D$.

Якщо ставиться завдання виконати сегментацію користувачів, наприклад, для опису поведінки користувачів під час ухвалення рішень (G), можна розбити учнів, зареєстрованих в ІОСУ, на види сегментів за рівнем технічних знань користувача з питань ІБ. Тоді студенти з глибшими пізнаннями в питаннях ІБ, відповідальніше поведуться в мережі університету, усвідомлюючи ризики ІБ і вживаючи заходів щодо безпечної роботи в мережі навчального закладу. Відповідно:

$$G = \langle NG, Type\_P, PA, TB, PR_g \rangle, \quad (3)$$

де G – поведінка користувачів під час ухвалення рішень; NG – назва (ім'я) групи; TB – вид поведінки; PR_g – близькість вподобань, що стосуються дотримання правил безпечної поведінки в мережі університету (для групи).

Інформацію про тип користувачів як осіб, які приймають рішення (ОПР), можна описати такою залежністю (4) – (CON)

$$CON = (ID\_user, Type\_user(t), Type\_P, PA, PR_u, PR_u(t), R_1, R_3), \quad (4)$$

де $Type\_user(t)$ – тип користувача за критеріями безпечної поведінки в ІОСУ; $PR_u, PR_u(t)$ – відповідно, множина вподобань користувача за критеріями ІБ, і множина вподобань на основі (4) (CON) у моменти часу (t) ; $R_3 \in PR_u \times PA$.

Так, наприклад, за критеріями безпечної поведінки в ІОСУ можна виділити такі типи користувачів:

Обізнані користувачі. До цієї групи можна віднести користувачів, які добре обізнані про ризики в мережі університету (або ІОСУ загалом) і вживають активних заходів для забезпечення безпеки своїх даних та акаунтів. Такого роду користувачі завжди дотримуються рекомендацій зі створення складних паролів, регулярно оновлюють програмне забезпечення, не відкривають підозрілих посилань або вкладень в електронних листах і використовують надійні антивірусні програми.

Недбалі користувачі. До цієї групи можна віднести користувачів, які не звертають належної уваги на заходи ІБ і можуть бути більш уразливими для атак. Зазвичай користувачів у даній групі характеризує використання слабких паролів, повтор паролів для різних акаунтів, несвоєчасне оновлення ПЗ, ігнорування підозрілої активності та заходів для захисту своїх даних в ІОСУ.

Користувачі, які не знають. До цієї групи можна віднести користувачів, які не володіють достатнім рівнем знань про заходи ІБ під час роботи в мережі. Вони можуть і не знати про ризики, пов'язані з відкриттям підозрілих посилань, не знайомі з правилами використання загальнодоступних Wi-Fi мереж. Такі користувачі можуть встановлювати ненадійне ПЗ, а також часто передають конфіденційні дані через незахищені канали зв'язку.

Байдужі користувачі. До цієї групи можна віднести користувачів, які не виявляють інтересу до питань ІБ у мережі, і, відповідно, не дотримуються жодних заходів ІБ. Ця категорія користувачів не перевіряє свої акаунти на наявність несанкціонованої активності та не звертає увагу на попередження про можливі загрози.

Безвідповідальні користувачі. Найнебезпечніша група користувачів в ІОСУ, яка порушує правила та політики ІБ у мережі університету. Вони можуть спробувати отримати несанкціонований доступ до систем ІОСУ, поширювати шкідливі програми, порушувати конфіденційність даних або вести недобросовісну активність в ІОСУ.

Зауважимо, що наведена вище категоризація типів користувачів доволі умовна, оскільки найчастіше немає чітких меж між згаданими вище категоріями користувачів, а також можуть існувати відтінки між ними. Крім того, у міру набуття знань, наприклад, завдяки відповідним курсам у навчальних програмах університетів, користувачі можуть переходити від одного типу до іншого, усвідомлюючи важливість ІБ у мережі та вживаючи відповідних заходів для захисту своїх даних та акаунтів.

Залежності (1) – (4) за їхньої відповідної алгоритмізації та програмної реалізації можна використовувати як базис під час генерації рекомендацій користувачеві ІОСУ для, наприклад, підвищення ступеня його ІБ під час роботи в мережі університету.

Під час аналізу ЦС в ІОСУ фахівцям з ІБ найчастіше доводиться стикатися саме з аналізом. Причому, лог-файли і ЦС з'єднані для аналізу цифрових доказів дій користувачів. Таким чином, лог-файли і ЦС взаємопов'язані, оскільки лог-файли містять інформацію про події та дії, які можуть бути проаналізовані для виявлення, ідентифікації та інтерпретації ЦС у світлі аналізу цифрових доказів активностей користувачів ІОСУ. По суті лог-файли – це незалежні характеристики роботи користувача в мережі університету. Вони містять інформацію про входи в систему, використання ресурсів, помилки, мережеву активність та інші події в ІОСУ.

Однак, щоб повністю зрозуміти нюанси роботи користувача, лог-файли зазвичай потребують аналізу та інтерпретації іншими інструментами або фахівцями. КЗХ роботи користувача в ІОСУ можуть містити інформацію про час, місцезнаходження, використані додатки та інші фактори, які можуть бути пов'язані з конкретною ситуацією або завданням користувача в ІОСУ. Ці характеристики можуть бути витягнуті з, але зазвичай потребують додаткового аналізу та контексту, що можна у світлі завдань забезпечення ІБ ІОСУ, наприклад, реалізувати в таких програмних продуктах як: Splunk, ELK Stack (стек програмних продуктів, що містить Elasticsearch, Logstash і Kibana) тощо. Якщо розглядати подію, пов'язану з ІБ ІОСУ, і зафіксовану, наприклад, у системі Splunk, то подію можна трактувати як факт, що був зафіксований у певний момент часу під час взаємодії певного користувача на певному пристрої з ІОСУ. Події матимуть непорожні унікальні набори атрибутів. До таких атрибутів можна віднести: ім'я користувача, пристрої взаємодії з ІОСУ, час взаємодії, типи події та ін. Також можливі й спеціальні атрибути, які залежать від типу події.

Для забезпечення ІБ ІОСУ до спеціальних атрибутів можна, наприклад, рівень доступу – визначає рівень привілеїв і доступу до інформації або ресурсів в ІОСУ; аудит і моніторинг – визначає, які дії та події записуватимуться і моніторитимуться системою, наприклад, Splunk, Elasticsearch, Logstash та Kibana; багатофакторна автентифікація - визначає, які методи автентифікації будуть використовуватись для перевірки особистості користувачів в ІОСУ; безпека мережі ІОСУ - визначає заходи безпеки, які застосовуються до мережі ІОСУ; оновлення і патчі - визначає, яким чином будуть оновлюватися і оновлюватися дані в мережі. Це лише невеликий перелік, що включає приклади спеціальних атрибутів, які можуть залежати від типу події ІБ в ІОСУ. Реальні атрибути можуть відрізнятися залежно від конкретних вимог і політик ІБ університету.

Введемо такі позначення: $E = \{e_1, \dots, e_n\}$ – множина подій, які зафіксовані в системах ІБ ІОСУ (антивірусне ПЗ, фаєрвол, IPS/IDS – системи виявлення та запобігання вторгненням, SIEM та ін.); $S = \{s_1, \dots, s_m\}$ – множина усіх зафіксованих сесій під час роботи студентів і викладачів з ІОСУ; $CL_e = \{cl_1, \dots, cl_k\}$ – множина класів подій ІБ, які мають певні властивості або ознаки. Тут $\{cl_i\}, i = \overline{1, k}$ – окремий клас ІБ. Наприклад, можна виконати таке розбиття на класи: "Адміністратори"; "Викладачі"; "Студенти"; "Гості". Відповідно, кожен клас для забезпечення ІБ матиме свої права доступу та обмеження, що дасть змогу керувати доступом до різних рівнів інформації в ІОСУ та захищати дані від несанкціонованого використання. Отже, патерн являтиме собою розміщення елементів множини $CL_e = \{cl_1, \dots, cl_k\}$, у якій є повторення: $rep_i = \langle cl_{i1}, \dots, cl_{ij} \rangle$, де $\{cl_{ij}\}, i = \overline{1, r}, j = \overline{1, q_i}, cl_{ij} \in CL_e$ – одинична подія для i – го патерну;

r – потужність множини патернів (P); q_i – сукупність подій для патерну. Кожну подію ІБ опишемо за допомогою непорожньої множини ознак (набору атрибутів) – $M = \{m_1, \dots, m_w\}$. Відповідно, ознаки, властиві об'єктам множини $E = \{e_1, \dots, e_n\}$. Вважаємо, що об'єкти в $E = \{e_1, \dots, e_n\}$ і ознаки в $M = \{m_1, \dots, m_w\}$ розрізняються. Відповідно до [22] має місце таке співвідношення $I|E \times M$, яке відповідає інцидентності між множинами $E = \{e_1, \dots, e_n\}$ і $M = \{m_1, \dots, m_w\}$. Наявність у I пари (e, m) , $e|M$ і $m|M$, відповідає тому, що об'єкт (e) має ознаку (m) . І навпаки, ознака (m) буде властива об'єкту (e) . Відповідно до [22], є множина ознак контексту $K = (E, M, I)$. Тоді, на множині ознак контексту $K = (E, M, I)$ буде справедливим наступне асоціативне правило $AR = (X, Y)$, яке має вигляд $X \Rightarrow Y$. Це правило буде кількісно за допомогою двох числових функцій характеризувати підтримку $\text{sup}(X \Rightarrow Y)$ і достовірність $\text{conf}(X \Rightarrow Y)$ асоціативного правила. У розрізі ІБ ІОСУ розв'язання задачі з пошуку послідовних патернів можна звести до виявлення максимальних послідовностей, що мають підтримку, вищу за заданий поріг. Іншими словами, для заданого $K = (E, M, I)$ необхідно знайти множину $AR = (X, Y)$ усіх асоціативних залежностей множини патернів (P). Зазначимо, що набір $AR = (X, Y)$ слід описати відносно порогових значень $\text{sup}(X \Rightarrow Y)$ і $\text{conf}(X \Rightarrow Y)$. Для того, щоб класифікувати події ІБ в ІОСУ можна обчислити цільову функцію на основі такого правила:

$$\text{conf}(X \Rightarrow Y) = \max f(E \rightarrow CL_e). \quad (5)$$

Як вище зазначалося, у процесі реалізації заходів, спрямованих на підвищення ІБ ІОСУ, і, відповідно, під час розв'язання локальних завдань з аналізу ЦС фахівцям з ІБ доводиться стикатися з аналізом. Практична реалізація задачі аналізу патернів (шаблонів), що містять необліковані персональні дані, була виконана за допомогою лог-файлів кількох курсів системи дистанційного навчання (СДН) Національного університету біоресурсів і природокористування України. Запити для візуалізації такої карти у Splunk, Elasticsearch, Logstash та Kibana, виглядають, наприклад, так:

```
sourcetype= access_combined_wcookie| iplocation clientip| stats count by Country| geom
geo_countries featureIdField="Country".
```

Покладемо, наприклад, що умовний ієрархічний лог-файл СДН складається з таких частин: процес; випадок; подія. Можна використовувати й складнішу ієрархічну структуру. Подію можна описати у форматі кортежу $\langle doc, op, per \rangle$, де doc – відповідний документ в ІОСУ; op – вид операції в ІОСУ; per – особа, яка виконала операцію (ОВО). Наприклад, розглянемо три компоненти процесу обігу документів у СДН університету: $Op \times Op$, $Per \times Per$ та $Per \times Op$. Отже, складову $Op \times Op$ можна описати відповідним лог-файлом Q . Цей файл відповідатиме сукупності послідовних траєкторій у такому вигляді $Q = \{tr_i | tr_i \in Op^*\}$. Тут траєкторія tr – випадок, для якого характерна така послідовність операцій, що $tr \in Op^*$. Де Op^* – сукупність усіх сполучень з алфавіту типів операцій у СДН університету – Op .

Друга компонента (складова) дає змогу описати організаційну структуру обігу документів у СДН, тобто - $Per(Q)$. Другу компоненту зручно відображати у вигляді

графа спільної роботи ОВО. Такий граф G_r має N вершин, де кожна вершина відповідає конкретному ОВО. Третя складова відображатиме розподіл ОВО за операціями відповідних процесів.

Ми використовували метод кластеризації для аналізу даних у, що характеризують стани ІБ СДН університету. Приймаємо, що вихідними даними будуть: множина ОВО $\{per_1, per_2, \dots, per_N\}$, що беруть участь у процесі документообігу, наприклад, для конкретних курсів у СДН; матриця близькості між діями $\{per_1, per_2, \dots, per_N\} - W_{ij}$; склад ОВО, що беруть участь у поодиноких випадках опрацювання документів у СДН – $per(doc)$. Нижче подано покроковий алгоритм, див. рис. 2, виявлення загрози порушення складу ОВО, які, наприклад, беруть участь у процесі реалізації спільного навчального проєкту, розміщеного в СДН.

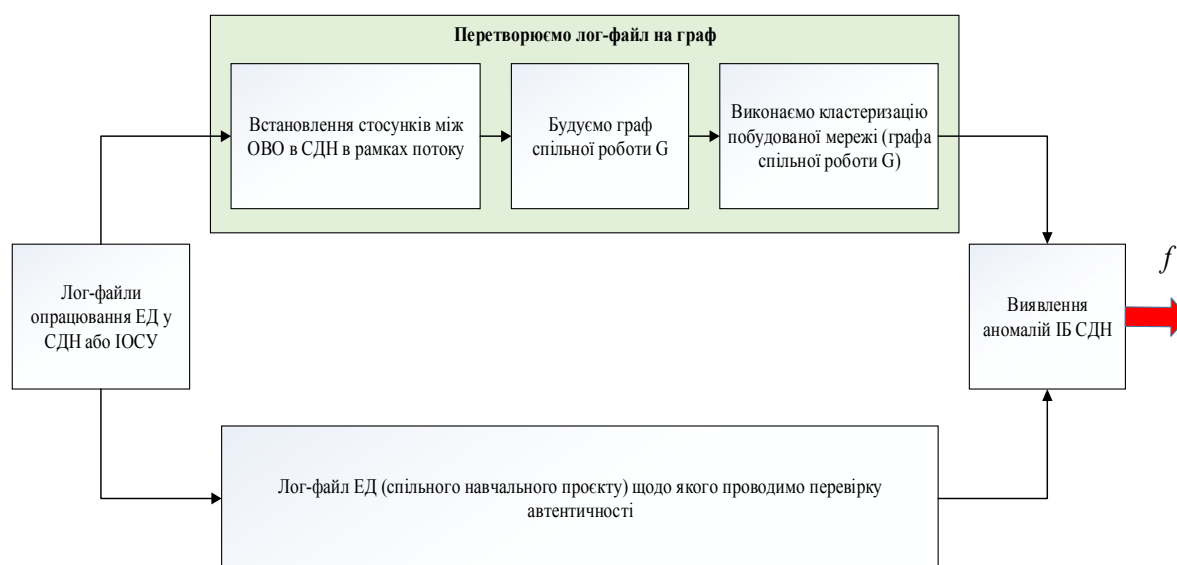


Рисунок 2 – Схема опрацювання лог-файлів під час аналізу порушення складу виконавців спільного навчального проєкту в системі дистанційного навчання університету

Джерело: розроблено автором

Крок 1. Створюємо N груп з однією ОВО в кожному $c_1 = \{per_1\}, c_2 = \{per_2\}, \dots, c_n = \{per_n\}$.

Крок 2. Обчислимо метрики близькості:

$$D(c_i, c_j) = \frac{1}{|c_i||c_j|} \cdot \sum_{x \leq |c_i|} \sum_{y \leq |c_j|} r_{xy}, \quad (6)$$

де $|c_i|$ – число вершин ОВО, що входять до групи i ; $|c_j|$ – число вершин ОВО, що входять до групи j ; r_{xy} – потужність зв'язку між вершинами графа.

Крок 3. Об'єднаємо пару груп, що характеризуються максимальною метрикою близькості. Кількість нових $N' = N - 1$.

Крок 4. Кроки 2,3,4 повторюються доти, $N' = 1$.

Крок 5. Виділяються групи для $G = \{g_1, g_2, \dots, g_{n-1}\}$.

Крок 6. Обчислюються коефіцієнти модулярності V [23] для кожної групи $g_i \in G$. Для чого було застосовано таку залежність [24]:

$$V = \left(\frac{1}{2 \cdot m} \right) \cdot \sum_{xy} \left(W_{xy} - \frac{k_x \cdot k_y}{2m} \right) \cdot \beta(u_x, u_y), \quad (7)$$

де m – сума ваг дуг графа; W_{xy} – матриця близькості; k_x, k_y – показники ступеня груп x і y (кількість інцидентних для них дуг); $\beta(u_x, u_y) = 1$, якщо вершини x і y належать одній групі і дорівнює 0 у протилежному випадку.

Крок 7. Визначимо, в якому випадку коефіцієнт модулярності V [23] матиме максимальне значення. Як результат отримуємо найкращий поділ на кластери, $Per(Q) = \{Cl_1, Cl_2, \dots, Cl_n\}$, де $Per(Q)$ – сукупність учнів, наприклад, на факультеті; Cl – кластери.

Крок 8. Знайдемо в базі довірених лог-файлів випадки, для яких ОВО, що беруть участь у спільному навчальному проєкті, перебуватимуть у різних кластерах. Для цього дивимось результати, отримані на кроці 7. Для $U_q = \{U_{q_1}, U_{q_2}, \dots, U_{q_n}\}$ визначимо метрики близькості для кожного набору U_q , застосувавши формулу (6).

Крок 9. Визначимо найменшу метрику близькості для набору $U_q = \{U_{q_1}, U_{q_2}, \dots, U_{q_n}\}$. Потім встановимо найменшу метрику близькості для набору як межу для виявлення випадків аномальностей для $D_{\min}$.

Крок 10. Вважаємо, що лог-файл, який перебуває на аналізі, характеризує набір ОВО, які беруть участь у спільному навчальному проєкті, тобто $per(doc)$. Визначимо найменше значення метрики близькості між $per(doc)$ і кластерами. Вираз має такий вигляд:

$$\min D(per(doc), K_i) = \min(D(per(doc), K_1), D(per(doc), K_2), \dots, D(per(doc), K_i)). \quad (8)$$

Крок 11. Визначимо значення функції f (на рисунку 2 показана стрілкою червоного кольору). Ця функція повідомляє про можливу аномальність набору ОВО, що бере участь у документопотоці $per(doc)$. Вважаємо, що цей документопотік належить до відносно $Per(Q)$.

Отримані результати можна обробляти спільно з текстовими, наприклад, використовуючи ПЗ Elasticsearch.

Під час реалізації експериментальної частини роботи було розглянуто основні види лог-файлів в ІОСУ, зокрема в СДН, та особливості зберігання й аналізу таких файлів з погляду забезпечення ІБ ІОСУ. Було проведено порівняльний аналіз систем журналювання подій серверів Windows і Linux, що дало змогу точніше визначити їхні відмінності та спільні риси. Експериментально було досліджено основні компоненти системи Elasticsearch, Logstash і Kibana для серверів двох зазначених вище університетів. Особливу увагу приділено розробці фільтрів і патернів для Logstash і шаблонів для Elasticsearch, які є ключовим елементом ефективного аналізу лог-файлів в ІОСУ. Таким чином, використовуючи наведені вище викладки, що стосуються схем

обробки лог-файлів і формування патернів ЦС, було зроблено висновок, що стек ELK є потужним інструментом для аналізу лог-файлів, як частини цифрового сліду студентів, і виявлення потенційних загроз безпеці ІОСУ

Висновки. Проаналізовано можливості використання даних цифрових слідів (ЦС) користувачів інформаційно-освітньої системи університету (ІОСУ) для інтелектуалізації ухвалення рішень, спрямованих на поліпшення інформаційної безпеки (ІБ). Показано, що для управління ІБ ІОСУ можна використовувати дані, отримані під час аналізу ЦС учнів і співробітників. Запропоновано концептуальну модель модуля системи підтримки ухвалення рішень (СППР), що ґрунтується на аналізі ЦС, яка враховує як контекстно-залежні, так і контекстно-незалежні характеристики (КЗХ і КНХ), що впливають на стан ІБ. Аналіз ЦС дає змогу менеджменту навчальних закладів не тільки відстежувати освітні траєкторії учнів і рівні їхніх компетенцій, а й надавати рекомендації для поліпшення ІБ через СППР для підрозділів, які опікуються захистом ІОСУ. Додаткові дослідження в галузі деталізованих моделей характеристик ЦС можуть стати основою для обчислювального ядра СППР, що сприяє побудові багатопланової системи ІБ. Експерименти показали, що стек ELK є ефективним інструментом для аналізу лог-файлів і виявлення загроз безпеці ІОСУ, забезпечуючи високий рівень захисту від несанкціонованого доступу.

Список літератури

1. Лахно В., Волошин С., Мамченко С., Кулініч О., Касаткін Д. Кластерний аналіз для дослідження цифрових слідів студентів закладів освіти. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2024. № 3(23). С. 31–41.
2. Пічкур М. О., Полудень Л. І., Демченко І. І., Сотська Г. І. Моніторинг цифрових слідів образотворчої підготовки здобувачів вищої мистецької освіти. *Інформаційні технології та засоби навчання*. 2023. № 2(94). С. 128–149.
3. Морзе Н., Кузьмінська О., Мазорчук М. Ставлення до цифрового навчального середовища в українських університетах. *ICT in Education, Research, and Industrial Applications. Proc. 15th Int. Conf. ICTERI 2019. Volume II: Workshops*. Запоріжжя : ЗНУ, 2019. Т. 2393. С. 53–67.
4. Andersen J. V., Lindberg A., Lindgren R., Selander L. Алгоритмічна агентура в інформаційних системах: дослідницькі можливості для аналітики даних цифрових слідів. *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. 2016. С. 4597–4605.
5. Hedman J., Srinivisan N., Lindgren R. Digital Traces of Information Systems: Sociomateriality Made Researchable. *Proceedings of the 34th International Conference on Information Systems*. Milan, 2013. Vol. 38. P. 809–830.
6. Ollagnier-Beldame M. Використання цифрових слідів: перспективна основа для проектування адаптованих інформаційних систем? *International Journal on Computer Science and Information Systems*. 2011. Vol. 6(2). P. 24–45.
7. Sen I., Flöck F., Weller K., Weiß B., Wagner C. Структура тотальної помилки для цифрових слідів поведінки людини на онлайн-платформах. *Public Opinion Quarterly*. 2021. Vol. 85(S1). P. 399–422.
8. Mohssine B., Mohammed A., Abdelwahed N., Mohammed T. Адаптивна система допомоги на основі "Цифрових слідів" учнів та стилів навчання. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*. 2021. Vol. 16(10). P. 288–294.
9. Kendall J. S., Dandapani N., Cicchinelli L. F. Бенчмаркінг інформаційної системи управління освітою штату Понпей. *REL 2017-175*. Pacific Regional Educational Laboratory, 2016.
10. Билієва Д. С., Лобатюк В. В., Рубцова А. В. Інформаційно-комунікаційні технології як активний принцип соціальних змін. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 337, № 1. P. 012054.
11. Билієва Д., Лобатюк В., Сафонова А., Рубцова А. Співвідношення між практичним аспектом курсу та прогресом електронного навчання. *Науки про освіту*. 2019. Т. 9, № 3. С. 167.
12. Смирнов А. В. Т., Левашова Т. В. Контекстно-свідомий підхід до інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі цифрових слідів користувачів. *Informatics and Automation*. 2020. Vol. 19(5). P. 915–941.
13. Almarghani E. M., Mijatovic I. Фактори, що впливають на залученість студентів у вищих навчальних закладах. *Teaching in Higher Education*. 2017. Vol. 22(8). P. 940–956.

14. Tara G., Mishra A. Порівняльне дослідження інструментів цифрової криміналістики для вилучення даних з електронних пристроїв. *2021*. С. 97–104.
15. Yulianto S., Soewito B. Дослідження впливу на відновлення даних у комп'ютерній криміналістиці. *IEEE Int. Conf. on Cryptography, Informatics, and Cybersecurity (ICoCICs)*. 2023. Р. 109–114.
16. Javed A. R., Ahmed W., Alazab M., Jalil Z., Kifayat K., Gadekallu T. R. Всебічний огляд комп'ютерної криміналістики: сучасний стан, інструменти, методи, виклики та майбутні напрямки. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. Р. 11065–11089.
17. Delija D., Mohenski I., Sirovatka G. Порівняльний аналіз інструментів мережевої криміналістики на різних операційних системах. *44th Int. Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*. 2021. Р. 1231–1235.
18. Mehrotra T., Mehtre B. M. Автоматизований інструмент криміналістичної експертизи метаданих зображень і Windows 7. *Int. Conf. on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*. 2014. Р. 419–425.
19. Huntington P., Nicholas D., Jamali H. R., Watkinson A. Отримання суб'єктних даних із лог-файлів за допомогою глибокого лог-аналізу: case study OhioLINK. *Journal of Information Science*. 2006. Vol. 32(4). Р. 299–308.
20. Zhu J., Wu H., Gao G. Ефективний метод видобутку веб-послідовних шаблонів на основі фільтра сеансів та ідентифікації транзакцій. *Journal of Networks*. 2010. Vol. 5(9). Р. 1017.
21. Wang J. Z., Huang J. L., Chen Y. C. Про ефективний видобуток послідовних шаблонів високої корисності. *Knowledge and Information Systems*. 2016. Vol. 49. Р. 597–627.
22. Wedyan S. Огляд і порівняння підходів до видобутку даних асоціативної класифікації. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*. 2014. Vol. 8(1). Р. 34–45.
23. Goswami A., Polly P. D. Методи вивчення морфологічної інтеграції та модульності. *Paleontological Society Papers*. 2010. Vol. 16. Р. 213–243.
24. Tsibulya A. N., NGIA H. M. Algoritma analiza zhurnala registratsii sistemnyih protsessorov sistemyi elektronnoho dokumentooborota s ispolzovaniem metoda klasterizatsii sotsialnyuyih setey. *Informatsionnye sistemy i tehnologii*. 2016. № 94(2). С. 148.

References

1. Lakhno, V., Voloshyn, S., Mamchenko, S., Kulinich, O., & Kasatkin, D. (2024). Cluster analysis for the study of digital footprints of students of educational institutions. Electronic professional scientific publication "Cybersecurity: Education, Science, Technology", 3(23), 31-41 [in Ukrainian].
2. Pichkur, M. O., Poluden, L. I., Demchenko, I. I., & Sotska, G. I. (2023). Monitoring of digital traces of fine arts training of applicants for higher art education. *Information Technologies and Learning Tools*, 2(94), 128-149 [in Ukrainian].
3. Morse, N., Kuzminska, O., & Mazorchuk, M. (2019). Attitudes towards the digital learning environment in Ukrainian universities. In *ICT in Education, Research, and Industrial Applications. Proc. 15th Int. Conf. ICTERI 2019. Volume II: Workshops*. (Vol. 2393, pp. 53-67). Zaporizhzhia National University, Department of Computer Science [in Ukrainian].
4. Andersen, J. V., Lindberg, A., Lindgren, R., & Selander, L. (2016, January). Algorithmic agency in information systems: research opportunities for analyzing digital footprint data. In *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* (pp. 4597-4605). IEEE.
5. J. Hedman, N. Srinivisan and R. Lindgren, "Digital Traces of Information Systems: Sociomateriality Made Researchable," *Thirty-fourth International Conference on Information Systems Milan 2013*, vol. 38, pp. 809-830, 2013.
6. Ollagnier-Beldame, M. (2011). Utilizing digital footprints: a promising framework for designing adapted information systems? *International Journal on Computer Science and Information Systems. Special issue "Users and Information Systems"*, 6(2), 24-45.
7. Sen, I., Flöck, F., Weller, K., Weiß, B., & Wagner, C. (2021). A total error framework for digital traces of human behavior on online platforms. *Public Opinion Quarterly*, 85(S1), 399-422.
8. Mohssine, B., Mohammed, A., Abdelwahed, N., & Mohammed, T. (2021). An adaptive tutoring system based on students' digital footprints and learning styles. *International Journal of Emerging Technologies in Education (iJET)*, 16(10), 288-294.
9. Kendall, J. S., Dandapani, N., & Cicchinelli, L. F. (2016). Benchmarking the Pohnpei State Education Management Information System. REL 2017-175. Regional Education Laboratory for the Pacific.
10. Bilyeva DS, Lobatyuk VV, Rubtsova AV (2019). Information and communication technologies as an active principle of social change. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 337, No. 1, p. 012054). IOP Publishing.

11. Bilyeva DS, Lobatyuk VV, Rubtsova AV (2019). Information and communication technologies as an active principle of social change. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 337, No. 1, p. 012054). IOP Publishing.
12. Bilyeva D., Lobatyuk V., Safonova A., Rubtsova A. (2019). The relationship between the practical aspect of the course and the progress of e-learning. *Education Sciences*, 9(3), 167.
13. Smirnov, A. V. T., & Levashova, T. V. (2020). Context-aware approach to intelligent decision support based on digital user footprints. *Informatics and Automation*, 19(5), 915-941.
14. Almarghani, E. M., & Mijatovic, I. (2017). Factors influencing student engagement in higher education - it's all about good teaching. *Teaching in Higher Education*, 22(8), 940-956.
15. Tara, Harshita and Amarnath Mishra. "A comparative study of digital forensics tools for data extraction from electronic devices." (2021): 97-104.
16. Yulianto, S., & Soewito, B. (2023, August). Research on the impact on data recovery in computer forensics. In 2023 IEEE International Conference on Cryptography, Informatics, and Cybersecurity (ICoCICs) (pp. 109-114). IEEE.
17. Javed, A. R., Ahmed, W., Alazab, M., Jalil, Z., Kifayat, K., & Gadekallu, T. R. (2022). A comprehensive review of computer forensics: state of the art, tools, techniques, challenges, and future directions. *IEEE Access*, 10, 11065-11089.
18. Delija, D., Mohenski, I., & Sirovatka, G. (2021, September). Comparative analysis of network forensics tools on different operating systems. In 2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO) (pp. 1231-1235). IEEE.
19. Mehrotra, T., & Mehre, B. M. (2014, July). An automated forensic tool for image metadata and Windows 7. In 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computing Technologies (ICCICCT) (pp. 419-425). IEEE.
20. Huntington, P., Nicholas, D., Jamali, H. R., & Watkinson, A. (2006). Extracting subject data from log files using deep log analysis: The OhioLINK case study. *Journal of Information Science*, 32(4), 299-308.
21. Zhu, J., Wu, H., & Gao, G. (2010). An efficient method for web sequential pattern mining based on session filter and transaction identification. *Journal of Networks*, 5(9), 1017.
22. Wang, J. Z., Huang, J. L., & Chen, Y. C. (2016). On efficient mining of sequential high utility patterns. *Knowledge and Information Systems*, 49, 597-627.
23. Wedyan, S. (2014). A survey and comparison of approaches to mining associative classification data. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 8(1), 34-45.
24. Goswami, A., & Polly, P. D. (2010). Methods for studying morphological integration and modularity. *Transactions of the Palaeontological Society*, 16, 213-243.
25. Tsibulya, A. N., & NGIA, H. M. (2016). Algoritm analiza zhurnala registratsii sistemnyih protsessov sistemy elektronnoho dokumentooborota s ispolzovaniem metoda klasterizatsii sotsial'nyih setey. *Informatsionnyie sistemii i tehnologii*, 94(2), 148.

Miroslav Lakhno

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Contextual Characteristics of Digital Footprints and Their Impact on University Information Security

For the studied area of information security management (ISM) of the university information and educational environment (IEE), it is shown that the effective use of data obtained by collecting and analyzing various digital footprints (DF) of users, including students, teachers and staff, is possible to increase the level of ISM and the degree of its protection against external and internal threats. A conceptual model of a decision support system (DSS) module based on the analysis of IOSS users' CS is developed. The model takes into account both context-dependent and context-independent characteristics of the CA (respectively, CCA, CCA) that affect the state of the IS in the IIS. The analysis of CS within the IES provides university IS specialists with the opportunity not only to determine the levels of competence and track individual educational trajectories of students, but also to develop appropriate controlling influences to ensure the sustainability of IS. We consider the use of software products such as Splunk and ELK Stack (which includes Elasticsearch, Logstash, and Kibana), which allow not only to effectively analyze but also to identify potential threats to IES. These tools provide universities with high efficiency in identifying, tracking and analyzing problems related to user's CA, thereby contributing to improved protection against unauthorized access to IPS resources.

information and educational environment, university educational environment, information security, digital footprints, decision-making

Одержано (Received) 09.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 30.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 02.05.2025

УДК 004.042+004.043

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.23-29](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.23-29)**М. В. Недюшев, В. В. Кириченко**, доц., канд. фіз.-мат. наук*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м.Київ, Україна**e-mail: m.nedoshev@nubip.edu.ua, v.kyrychenko@nubip.edu.ua*

Особливості роботи складних обчислювальних алгоритмів на прикладі перевірки гіпотези Поллока

В роботі проведено аналіз алгоритмів пошуку представлення числа як суми тетраедричних чисел із використанням різних методів оптимізації, таких як жадібний алгоритм, апроксимація, двоє вказівників, мемоізація та багатопотоковість. Розглянуто різні техніки, що сприяють зменшенню часу обчислень, зокрема багатопотокова обробка та використання ефективних структур даних. Описано, як реалізувати ці методи в контексті різних мов програмування. Також проведено експерименти з оцінкою продуктивності різних підходів та порівняння результатів. Результати демонструють суттєве підвищення швидкості виконання алгоритму під час використання багатопотокових підходів та оптимізації коду.

гіпотези Поллока, алгоритми пошуку, складність алгоритмів алгоритм, паралельні складні обчислення, багатопотоковість

Постановка проблеми. Гіпотези Поллока стосуються представлення чисел у вигляді суми фігурних чисел. Зокрема, третя гіпотеза Поллока стверджує, що будь-яке натуральне число можна представити у вигляді суми не більше ніж п'яти тетраедричних чисел. Попри те, що ця гіпотеза було висунуто ще у XIX столітті, її доведення або спростування досі залишається відкритим питанням у теорії чисел.

Ключовою проблемою під час дослідження є побудова ефективного обчислювального алгоритму, який дозволяє знаходити відповідне представлення для довільного натурального числа N . Оскільки тетраедричні числа зростають за кубічною прогресією, наївний повний перебір комбінацій супроводжується високими обчислювальними витратами, особливо при великих значеннях N . Це зумовлює необхідність розробки оптимізованих підходів до перебору, які мінімізують кількість операцій та забезпечують масштабованість.

Метою дослідження є створення продуктивного алгоритму для перевірки третьої гіпотези Поллока, а також його реалізація та експериментальне тестування на практиці з використанням різних мов програмування — JavaScript, Python, Apple Metal (GPU) та C — для порівняння їхньої продуктивності та особливостей реалізації. Результатом дослідження має бути порівняння виконання складних алгоритмів використовуючи поширені скриптові мови програмування, такі як JavaScript та Python, з C та виконанням коду на графічному адаптері з використанням паралелізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гіпотези Поллока одна із проблем адитивної теорії чисел сформована Фредеріком Поллоком у 1850 році. Не дивлячись на простоту формулювання гіпотез, вони не доведені математичним шляхом. Однак гіпотезу було перевірено емпірично через 150 років. Було перевірено до 250 000 000 чисел і виявлено що існує мінімум 241 число, яке формується сумою не менше як 5 тетраедричних чисел, останнє з яких 343 867 [1].

Для виявлення особливостей роботи алгоритмів, алгоритм спочатку тестується використовуючи просту скриптову мову. Автори роботі [2] та [3] провели порівняння актуальних скриптових мов програмування у роботі з великою кількістю даних. Окремо має сенс перевірити виконання обрахунків використовуючи графічний адаптер, як зроблено авторами [4].

Постановка завдання. Перевірка третьої гіпотези Поллока про представлення

будь-якого натурального числа у вигляді суми не більше ніж п'яти тетраедричних чисел є важливим завданням у теорії чисел. Оскільки математичного доведення цієї гіпотези досі немає [1], необхідно розробити ефективний алгоритм для її експериментальної перевірки. Тому постає завдання дослідити властивості тетраедричних чисел та їх застосування для перевірки гіпотези Поллока.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити математичні властивості тетраедричних чисел, їхнє зростання та особливості представлення натуральних чисел.
2. Розглянути наявні алгоритмічні підходи до розкладу чисел на суму фігурних чисел.
3. Розробити ефективний для великих чисел алгоритм, що знаходить представлення числа у вигляді суми від одного до п'яти тетраедричних чисел.
4. Встановити метрики для перевірки ефективності алгоритму.
5. Реалізувати алгоритм у вигляді програмного коду та провести тестування використовуючи декілька мов програмування, які досліджуються.
6. Проаналізувати отримані результати, визначити закономірності та можливі винятки.

Виклад основного матеріалу. Гіпотеза Поллока про представлення натуральних чисел у вигляді суми тетраедричних чисел є однією з невирішених задач теорії чисел. Для її експериментальної перевірки необхідно розробити алгоритм, що дозволяє знаходити такі представлення ефективним способом.

Визначимо формулу для обчислення тетраедричних чисел, потім проаналізуємо можливі методи розкладу чисел у їхню суму та розглянемо оптимізаційні стратегії, які дозволяють зменшити обчислювальну складність.

Тетраедричні числа — це особливий вид фігурних чисел, які відповідають кількості куль у тривимірній піраміді (тетраедрі), які можна представити у вигляді формули (1) для будь-якого натурального числа n .

$$T_n = \frac{n(n+1)(n+2)}{6} \quad (1)$$

де T_n — n -те тетраедричне число.

Згідно з третьою гіпотезою Поллока, будь-яке натуральне число (N) може бути подано у вигляді суми не більше ніж п'яти тетраедричних чисел (2).

$$N = T_{i1} + T_{i2} + T_{i3} + T_{i4} + T_{i5} \quad (2)$$

де $i1, i2, i3, i4, i5$ — деякі натуральні числа.

Послідовність перших тетраедричних чисел [5] виглядає наступним чином: 1, 4, 10, 20, 35, 56, 84, 120, 165, 220...

Ці числа ростуть квадратично, що ускладнює пошук їхніх сум для великих значень N .

Для доведення що будь-яке число N можна отримати додавши максимум п'ять тетраедричних чисел було створено алгоритм, який перебирає можливі суми від одного до п'яти тетраедричних чисел поки їх сума не буде дорівнювати N .

Алгоритм має перебирати можливі комбінації із п'яти чисел, що в гіршому випадку має складність $O(n^5)$. Очевидно що можна використовувати більш оптимальне рішення. Для оптимізації алгоритму було використано такі принципи оптимізації: принцип жадібного алгоритму, апроксимацію математичних виразів, пошук з використанням двох показників, мемоізації та паралельні обчислення.

Пошук до п'яти тетраедричних чисел, які утворюють задане число N можна розглядати поетапно: спочатку перевірити чи є число, якого само по собі вже достатньо для утворення числа N (3), потім знайти такі два числа, які утворюють у сумі N і так п'яти чисел. Потрібно знайти оптимальне рішення для пошуку T_i для таких випадків.

$$\begin{aligned} T_1 &= N \\ T_1 + T_2 &= N \\ T_1 + T_2 + T_3 &= N \\ T_1 + T_2 + T_3 + T_4 &= N \end{aligned} \quad (3)$$

$$T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 = N$$

Для пошуку першого числа з суми (T_1), потрібно перевірити чи є число N тетраедричним — якщо число N тетраедричне, значить це число $T_1 = N$. Для цього потрібно представити формулу тетраедричного числа у вигляді кубічного рівняння (4) і підставити число N як y , де x буде індексом тетраедричного числа. Таким чином перший елемент можна знайти за $O(1)$. Операція розв'язання кубічного рівняння не швидка сама по собі. Тому було вирішено спростити формулу розв'язання для пошуку числа наближеного до індексу тетраедричного числа (5). Отже, формула пошуку тетраедричного числа виглядає наступним чином:

$$y = \frac{x^3 + 3x^2 + 2x}{6} \quad (4)$$

$$x_{approx} \approx \lfloor \sqrt[3]{6y + 3 + 2} \rfloor \quad (5)$$

Таким чином було відкинуто зайвий пошук дискримінантів і зменшено кількість операцій для пошуку наближеного індексу ближчого тетраедричного числа. Наближене значення має похибку не більше одиниці. Можна отримати індекс числа значно більше за N , в такому випадку індекс потрібно зменшити на один.

Для отримання найближчого тетраедричного числа, яке менше за саме число можна використовувати таку формулу (6).

$$x = \max(x_{approx} - \delta, 0) \quad (6)$$

де $\delta = 1$, якщо $x_{approx} > \frac{y(y+1)(y+2)}{6}$, інакше $\delta = 0$

Якщо підставити тетраедральне число за знайденим індексом і воно дорівнює N , то перший випадок $N = T_1$, отже для числа N виконується гіпотеза Поллока.

Для пошуку двох доданків тетраедричних чисел, які формують число N можна використовувати метод пошуку з двома показниками, що має складність $O(n)$ [6]. Ідеально було б використовувати бінарний пошук, але суми двох тетраедричних чисел, на відміну від самої послідовності тетраедричних чисел не є зростаючою.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	5	11	21	36	57	85	121	166	221
2	5	8	14	24	39	60	88	124	169	224
3	11	14	20	30	45	66	94	130	175	230
4	21	24	30	40	55	76	104	140	185	240
5	36	39	45	55	70	91	119	155	200	255
6	57	60	66	76	91	112	140	176	221	276
7	85	88	94	104	119	140	168	204	249	304
8	121	124	130	140	155	176	204	240	285	340
9	166	169	175	185	200	221	249	285	330	385
10	221	224	230	240	255	276	304	340	385	440

Рисунок 1 – Суми двох тетраедричних чисел

Джерело: розроблено авторами

З рисунка 1 видно, що немає чіткої прогресії при додаванні тетраедричних чисел, тобто умова $x_{i1} + x_{i2} \leq f(x_{i1}) + f(x_{i2})$ не виконується, де $f(x) = \frac{x(x+1)(x+2)}{6}$. Також з рисунка 1 видно що суми повторюються, оскільки $T_{i1} + T_{i2} = T_{i2} + T_{i1}$ тоді має сенс виконувати пошук лише для $T_{i1} + T_{i2}$ при $i2 < i1$.

Формулу пошуку найближчого тетраедричного числа (x_{approx}) можна використовувати для знаходження лімітів в рамках яких можна шукати інші числа, які можуть формувати суму. Таким чином можна сильно знизити кількість елементів, які потрібно перевіряти. Для кожної перевірки наступних чисел потрібно знайти верхню та нижню границю індексів тетраедричних чисел, які має сенс перевіряти. Для верхньої границі немає сенсу підставляти в T_i числа більше за N . Для нижньої границі мінімальне число залежить від кількості доданків. Так, наприклад, для пошуку двох

доданків, немає сенсу перевіряти числа, які разом менше за $N/2$. Тоді для пошуку доданків можна встановити такі ліміти за формулою (7).

$$\frac{N}{c} \leq x_i \leq N \quad (7)$$

де c – кількість доданків, x_i – тетраедричні числа, що перевіряються, N – число для якого шукаються доданки.

Для пошуку трьох чисел які формують число N потрібно перебрати T_{i3} використовуючи ліміти та знайти два числа $T_{i1} + T_{i2}$, які утворюють $N - T_{i3}$, що є алгоритмом складності $O(n^2)$. Те саме стосується для пошуку T_{i4} та T_{i5} . Отже, пошук суми дорівнює $O\left(\frac{n}{5}\right) * O\left(\frac{n}{4}\right) * O\left(\frac{n}{3}\right) * O\left(\frac{n}{2}\right) * O(1) = O\left(\frac{n^4}{120}\right)$ в гіршому випадку, де n - це кількість тетраедричних чисел менших за задане N , що приблизно дорівнює $\sqrt[3]{6N + 5}$. Використовуючи принцип жадібного алгоритму, перебір чисел починається з найбільших, таким чином кількість ітерацій значно зменшується.

На рисунку 2 представлено розподіл кількості мінімальних тетраедричних чисел для формування натуральних чисел. Враховуючи що з п'яти чисел більше комбінацій то швидше алгоритм працює коли шукаються одразу від 5 доданків. В такому випадку розподіл результату може виглядати не самим оптимальним у порівнянні з пошуком можливих сум с доданками по черзі від 1 до 5. Але враховуючи що існує лише 241 [1] число, яке потребує суми мінімум п'яти тетраедричних для підтвердження гіпотези Поллока, то швидше буде перевірити 4 числа і в разі невдачі, перевірити 5 доданків.

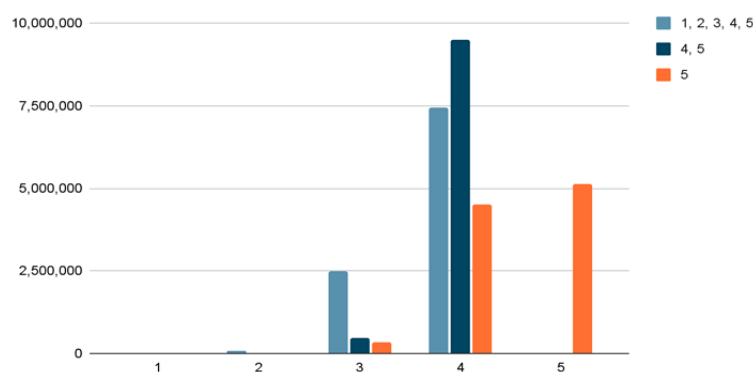


Рисунок 2 – Розподіл мінімально необхідної кількості тетраедричних чисел для формування натуральних чисел

Джерело: розроблено авторами

Використовуючи принцип жадібного алгоритму, якщо починати віднімати від цільового числа N максимально близькі тетраедричні числа, швидко задача зводиться до знаходження суми для маленьких чисел, які вже обчислювались. Тому має сенс використовувати мемоізацію для маленьких чисел, наприклад, перші можливі суми, які утворюють від одного до трьох перших 50 тетраедричних числа, але на дуже великих числах приріст у швидкості виконання вже не так сильно помітно, оскільки числа ростуть квадратично і кількість тетраедричних чисел, які потрібно перевірити значно збільшується.

Для тестів використовувався процесор Apple M1 Pro - 10 ядер, 2 з яких енергоефективні, 16GB LDDR5 оперативної пам'яті, Apple M1 Pro GPU, 16 Cores. Тести проводилися з використанням Node та Bun - платформи, яка може виконувати TypeScript та JavaScript код без браузера, Python та Apple Metal Framework. На рисунку 3 представлений графік, який показує роботу алгоритму виконуючи алгоритм в одному потоці.

Наступний етап оптимізації це використання багатопотоковості. Оскільки алгоритм шукає елементи суми для кожного числа незалежно від інших чисел, то можна поділити перевірку гіпотези Поллока на декілька окремих потоків. Для цього

можна використовувати як окремі потоки центрального процесора, так і графічного процесора. Для виконання на графічному процесорі з алгоритму потрібно прибрати рекурсивні виклики, що доволі просто зробити створивши копії основної функції пошуку до трьох разів для пошуку T_{i1} , T_{i2} , T_{i3} .

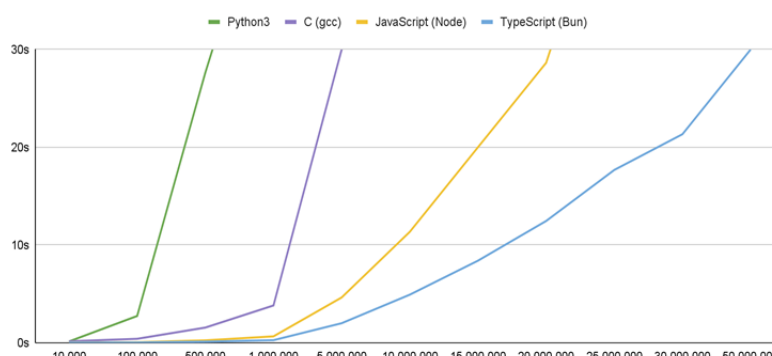


Рисунок 3 – Графік залежності часу від кількості елементів для розрахунку на різних платформах та мовах програмування

Джерело: розроблено авторами

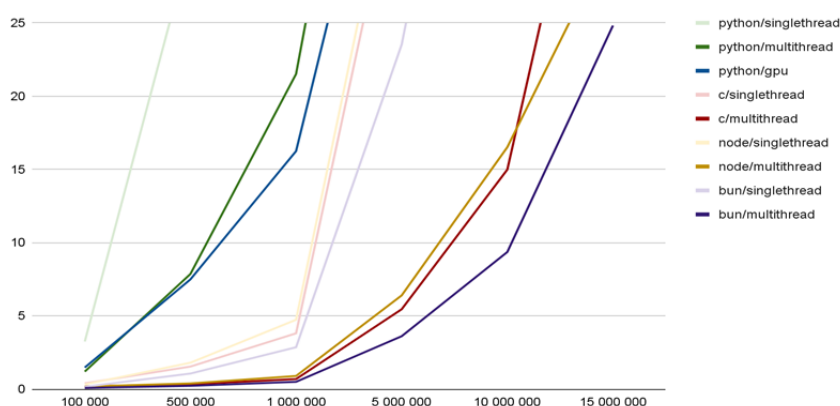


Рисунок 4 – Графік залежності часу від кількості елементів для розрахунку на різних платформах та мовах програмування з використанням багатопотоковості

Джерело: розроблено авторами

З рисунка 4 видно що паралелізм дає значного прискорення для Python, Bun, NodeJS та C.

Для Python було додано варіант паралелізму з використанням графічного адаптера. Використовуючи Apple Metal Framework [7] алгоритм було написано у вигляді шейдера, який перевіряє натуральні числа на відповідність третій гіпотезі Поллока, Python же використовував відображення до фреймворку Apple Metal. Було спеціально мінімізовано дані, які передаються від CPU до GPU. Вхідними даними для шейдера є початок (зсув), а вихідними даними одне число, де 0 означає що сума не була знайдена, а 1 що сума знайдена. Таким чином було мінімізовані дані, які потрібно передавати між CPU і GPU. Завдяки цьому значно зменшилось навантаження на канал передачі даних, що позитивно позначилось на загальній продуктивності. В середньому використовувалось від 10 до 40 мб пам'яті.

Для мови C була використана багатопоточність за допомогою бібліотеки pthread, що дозволило ефективно розподілити обчислювальне навантаження на кілька ядер процесора. Компіляція з оптимізацією за допомогою GCC (-O3) також допомогла забезпечити максимальну продуктивність. Цей підхід дозволив повторити структуру коду, схожу на ті, що використовуються в інших мовах, і забезпечити масштабованість при обробці великих обсягів даних. Використання пам'яті мінімальне – 1мб.

У середовищах Bun і NodeJS використовувалася багатозадачність через Worker-и, що дозволило максимально ефективно використовувати багатоядерні процесори. Ці платформи автоматично оптимізують розподіл потоків через Thread Pool, що додатково підвищує ефективність виконання алгоритмів без необхідності вручну налаштовувати кількість потоків. Використання пам'яті максимальне від 60 до 270 мб.

Було протестовано алгоритм для натуральних чисел від 1 до 1 000 000 000, перевірено для всіх цих чисел гіпотеза Поллока справедлива за 81 хвилин та 22 секунди з середнім споживанням пам'яті 387.563 МБ, використовуючи платформу Bun.

Висновки. У ході дослідження було розроблено і показано ефективність алгоритму для експериментальної перевірки третьої гіпотези Поллока, яка стверджує, що будь-яке натуральне число можна представити у вигляді суми не більше ніж п'яти тетраедричних чисел.

Алгоритм спеціально оптимізовано для роботи з великими числами. Апроксимація, пошук з двома показниками та паралелізм позитивно вплинули на роботу алгоритму. Мемоїзація ж не дала значного зростання продуктивності на великих числах.

Найшвидшим з тестів виявився Bun у багатопотоковому режимі навіть швидше за C. Порівнюючи швидкодію C з NodeJS у інших тестах [8], можна дійти висновку, що часто трапляються випадки, коли NodeJS та C мають схожу продуктивність. Розробники Bun на своєму сайті стверджують [9], що швидкість виконання JavaScript коду на платформі Bun швидша за NodeJS, що відповідає проведеному дослідженню та видно на рисунку 4. Платформа Bun виконує JavaScript код і сама додає оптимізації, що значно простіше за написання C.

З графіка на рисунку 4 видно, що виконання на графічному процесорі лише трохи прискорює роботу алгоритму у порівнянні з багатопотоковістю на центральному процесорі, що збігається з дослідженням у [10]. Виконання на GPU не завжди може дати великий приріст продуктивності, але додає складності коду.

В результаті перевірки до 1 000 000 000 було виявлено лише 241 число, яке потребує 5 доданків, і число 343 867 є останнім з таких виняткових чисел, що відповідає припущенню в дослідженні [1]. Використанням пам'яті майже однакоє при перевірці великих чисел та менше. Надалі можна протестувати алгоритм використовуючи більш продуктивний процесор або Nvidia CUDA, для перевірки алгоритму на більших числах.

Список літератури

1. Salzer H., Levine N. Table of Integers Not Exceeding 100000 That Are Not Expressible as the Sum of Four Tetrahedral Numbers // *Mathematics of Computation*. 1958. Т. 12. С. 141–144. DOI: 10.1090/S0025-5718-1958-0099756-3 (дата звернення: 02.04.2025).
2. Dhalla H. A performance analysis of native JSON parsers in Java, Python, MS.NET Core, JavaScript, and PHP // *2020 16th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, 2–6 листопада 2020 р., Ізмір, Туреччина. С. 1–5. DOI: 10.23919/CNSM50824.2020.9269101 (дата звернення: 04.04.2025).
3. Lei K., Ma Y., Tan Z. Performance Comparison and Evaluation of Web Development Technologies in PHP, Python, and Node.js // *2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering*, 19–21 грудня 2014 р., Ченду, Китай. DOI: 10.1109/CSE.2014.142 (дата звернення: 08.04.2025).
4. Huang Q., Lu N. Optimized Real-Time MUSIC Algorithm With CPU-GPU Architecture // *IEEE Access*. 2021. Т. 9. С. 54067–54077. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3070980 (дата звернення: 08.04.2025).
5. Sloane N. J. A. Послідовність A000797 [Електрон. ресурс] // *The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences (OEIS)*. 2024. Режим доступу: <https://oeis.org/A000797> (дата звернення: 06.04.2025).
6. Zinnia N., Hanada E. Optimizing Search Strategies: A Study of Two-Pointer Linear Search Implementation // *arXiv preprint*. 2024. June. DOI: 10.48550/arXiv.2406.16729 (дата звернення: 08.04.2025).
7. Performing Calculations on a GPU [Електрон. ресурс] // *Apple Developer Documentation*. Режим доступу: <https://developer.apple.com/documentation/metal/performing-calculations-on-a-gpu> (дата звернення: 10.04.2025).
8. The Computer Language 25.03 Benchmarks Game [Електрон. ресурс]. Режим доступу: <https://benchmarksgame-team.pages.debian.net/benchmarksgame/index.html> (дата звернення: 10.04.2025).

9. Bun — A fast all-in-one JavaScript runtime [Електрон. ресурс]. Режим доступу: <https://bun.sh/> (дата звернення: 10.04.2025).
10. Gebraad L., Andreas F. Seamless GPU acceleration for C++ based physics with the Metal Shading Language on Apple's M series unified chips // *Seismological Research Letters*. 2023. Т. 94. DOI: 10.1785/0220220241 (дата звернення: 10.04.2025).

References

1. Salzer, H., & Levine, N. (1958). Table of integers not exceeding 100000 that are not expressible as the sum of four tetrahedral numbers. *Mathematics of Computation*, 12, 141–144. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1958-0099756-3>.
2. Dhalla, H. (2020). A performance analysis of native JSON parsers in Java, Python, MS.NET Core, JavaScript, and PHP. In *Proceedings of the 16th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, 2–6 November 2020, Izmir, Turkey (pp. 1–5). <https://doi.org/10.23919/CNSM50824.2020.9269101>.
3. Lei, K., Ma, Y., & Tan, Z. (2014). Performance comparison and evaluation of web development technologies in PHP, Python, and Node.js. In *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering*, 19–21 December 2014, Chengdu, China. <https://doi.org/10.1109/CSE.2014.142>.
4. Huang, Q., & Lu, N. (2021). Optimized real-time MUSIC algorithm with CPU-GPU architecture. *IEEE Access*, 9, 54067–54077. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070980>.
5. Sloane, N. J. A. (2024). Sequence A000797 [Electronic resource]. *The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences (OEIS)*. Retrieved April 6, 2025, from <https://oeis.org/A000797>.
6. Zinnia, N., & Hanada, E. (2024). Optimizing search strategies: A study of two-pointer linear search implementation. *arXiv preprint*. June. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.16729>.
7. Performing Calculations on a GPU [Electronic resource]. *Apple Developer Documentation*. Retrieved April 10, 2025, from <https://developer.apple.com/documentation/metal/performing-calculations-on-a-gpu>.
8. The Computer Language 25.03 Benchmarks Game [Electronic resource]. Retrieved April 10, 2025, from <https://benchmarksgame-team.pages.debian.net/benchmarksgame/index.html>.
9. Bun — A fast all-in-one JavaScript runtime [Electronic resource]. Retrieved April 10, 2025, from <https://bun.sh/>.
10. Gebraad, L., & Andreas, F. (2023). Seamless GPU acceleration for C++ based physics with the Metal Shading Language on Apple's M series unified chips. *Seismological Research Letters*, 94. <https://doi.org/10.1785/0220220241>.

Maksym Nedoshev, Viktor Kyrychenko, Assoc. Prof., PhD phys. and math. sci.
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Peculiarities of the Operation of Complex Computational Algorithms using the Example of Testing the Pollock Hypothesis

The aim of this article is to investigate and experimentally verify Pollock's third hypothesis, which states that any natural number can be represented as the sum of no more than five tetrahedral numbers. The main focus is on developing an efficient algorithm capable of processing large numbers to test the hypothesis on a numerical range up to one billion.

Within the research, an algorithm was designed and implemented that combines several modern optimization techniques: two-pointer search, approximation methods, multithreading, and memorization testing. Particular attention was paid to benchmarking different implementations across platforms — NodeJS, Bun, C, Python and GPU. The test results are presented in the form of graphs for both single-threaded and multi-threaded code execution. Experimental results showed that Bun in multithreaded mode demonstrated the highest performance, even outperforming C in certain cases. This supports the developers' claims regarding the speed of Bun. A comparison between CPU and GPU implementations using Python revealed that GPU acceleration provides only a slight improvement in performance while shader language significantly increasing code complexity compared to Python code. The experimental study covered all natural numbers up to one billion to verify the hypothesis.

As a result of testing, only 241 numbers required five tetrahedral summands, with the last such exceptional number being 343,867. This finding aligns with previous research. The algorithm showed stable memory usage across both small and large numbers. Future studies may focus on utilizing CUDA or high-performance computing clusters to validate the hypothesis over even larger numerical ranges.

Pollock's hypothesis, tetrahedral numbers, algorithm optimization, multithreading, GPU computing

Одержано (Received) 15.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 02.05.2025

УДК 004.412

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.30-37](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.30-37)**А. С. Приходько, Є. В. Малахов**, проф., д-р техн. наук*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса, Україна**e-mail: whiterandrek@gmail.com, eugene.malakhov@onu.edu.ua*

Удосконалена математична модель оцінювання якості вебдодатків з відкритим кодом

Робота присвячена підвищенню достовірності оцінок якості вебзастосунків з відкритим кодом, розроблених із застосуванням фреймворків PHP, за метриками RFC, CBO та WMC. Наукова новизна результатів дослідження полягає в удосконаленні математичної моделі у вигляді довірчих інтервалів та інтервалів прогнозування нелінійних регресій для метрик RFC, CBO та WMC на рівні додатку для оцінювання якості ПЗ на основі тривимірного перетворення Бокса-Кокса, яка, на відміну від існуючих моделей, дозволяє здійснювати відповідне оцінювання для веб-додатків з відкритим кодом, розроблених за допомогою PHP фреймворків. Отримані результати мають наукове та практичне значення для оцінювання якості веб-додатків з відкритим кодом, розроблених з використанням таких відомих PHP фреймворків, як CakePHP, CodeIgniter, Laravel, Symfony та Yii, за даними їхніх метрик RFC, CBO та WMC на рівні додатку та можуть бути застосовані для створення нових моделей та алгоритмів для оцінювання якості веб-додатків.

математична модель, якість, програмне забезпечення, веб-додаток, нормалізуюче перетворення, нелінійна регресія, програмна метрика

Постановка проблеми. Створення якісного програмного забезпечення (ПЗ) залишається одним з головних завдань індустрії його розробки. Останніми роками популярність ПЗ з відкритим вихідним кодом зростає і воно все частіше використовується або як програмний інструмент або як компонент програми [1]. Тому вибір якісного ПЗ з відкритим кодом є важливим. Зазначене також стосується веб-додатків з відкритим кодом, розроблених із застосуванням PHP фреймворків, оскільки сьогодні багато веб-додатків розробляються саме за їх допомогою.

Незважаючи на існуючі методи оцінювання якості ПЗ, все ще бракує ефективного методу оцінювання загальної якості [2]. Про важливість проблеми оцінювання якості ПЗ свідчать також публікації останніх років [1, 3-8]. Вищезазначене вимагає побудови математичних моделей для оцінювання якості ПЗ, у тому числі веб-додатків з відкритим кодом, розроблених із застосуванням PHP фреймворків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо, для аналізу об'єктно-орієнтованого (ОО) ПЗ існують спеціальні набори метрик, наприклад, СК [9] і MOOD [10]. Однак лише метрики СК призначені для вимірювання трьох етапів ОО проектування у визначенні Буча. Тому сьогодні для оцінювання якості ПЗ у тому числі використовуються метрики СК, включаючи RFC (Response for Class), CBO (Coupling Between Objects) та WMC (Weighted Methods per Class) на рівні застосунку [8].

Хоча алгоритми машинного навчання стають все більш популярними для оцінювання якості ПЗ [3], методи регресійного аналізу ще не повністю розкрили свій потенціал [4, 8, 11-13]. У [4] автори об'єднали множинну лінійну регресію та метод нечіткої комплексної оцінки для побудови алгоритму оцінювання якості. У [13] автори використали алгоритм лінійної регресії для прогнозування щільності дефектів у програмних застосунках і дійшли висновку, що існуючі підходи, включаючи міркування на основі кейсів, є менш точними, ніж методологія лінійної регресії.

Але застосування лінійної регресії теоретично може бути обґрунтовано лише у певних випадках, зокрема, коли розподіл відхилень точок даних від лінії регресії є

нормальним. Тому в [11] для оцінювання якості ПЗ автори запропонували методику, засновану на довірчих інтервалах та інтервалах прогнозування нелінійної регресії для метрики RFC на рівні застосунку в залежності від метрик CBO та WMC. Наразі відоме використання цієї методики для оцінювання якості застосунків із відкритим кодом, розроблених на Java [11] та Kotlin [12]. Однак метрики CBO і WMC, як і RFC, також слід розглядати як залежні змінні, що характеризують якість програмних систем. Тому в [8] була запропонована модифікація зазначеної методики для оцінювання якості програмних систем з точки зору їх ОО проєктування. Ця модифікація базується на довірчих інтервалах і інтервалах прогнозування трьох нелінійних регресій для метрик RFC, CBO та WMC відповідно. На теперішній час не існує математичної моделі для оцінювання якості веб-додатків з відкритим кодом, розроблених із застосуванням РНР фреймворків. Тому подібно [8] в цій роботі ми запропонували побудувати математичну модель для оцінювання якості веб-додатків з відкритим кодом, розроблених із застосуванням РНР фреймворків.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є удосконалення математичної моделі для оцінювання якості веб-додатків з відкритим кодом, розроблених із застосуванням РНР фреймворків, яка дозволить здійснити підвищення достовірності визначення якості цих застосунків за програмними метриками RFC, CBO та WMC.

Для досягнення зазначеної мети треба розв'язати наступні завдання.

1. Для побудови удосконаленої моделі сформулювати вибірку даних з програмних метрик RFC, CBO і WMC та розділили її на два набори (навчальний і тестовий).
2. Удосконалити математичну модель за навчальним набором даних та перевірити її якість за навчальним і за тестовим наборами даних.

Виклад основного матеріалу. Згідно з [8] для оцінювання якості веб-додатків з відкритим кодом, розроблених із застосуванням РНР фреймворків, спочатку нам треба побудувати три моделі нелінійної регресії для метрик RFC, CBO та WMC.

Ми будуюмо моделі нелінійної регресії для метрик RFC, CBO та WMC на основі тривимірною перетворення Бокса-Кокса (Вох-Сох) у формі [8]

$$Y = [\hat{\lambda}_Y (\hat{Z}_Y + \varepsilon) + 1]^{1/\hat{\lambda}_Y}, \quad (1)$$

де ε – гаусівська випадкова величина, $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$;

$\hat{\sigma}_\varepsilon$ – оцінка середньоквадратичного відхилення величини ε ;

$\hat{Z}_Y$ – результат прогнозу за рівнянням лінійної регресії $\hat{Z}_Y = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 Z_1 + \hat{b}_2 Z_2$ в залежності від факторів Z_1 та Z_2 для нормалізованих даних, які перетворені за допомогою тривимірною перетворення Бокса-Кокса (ПБК) з компонентами

$$Z_j = \begin{cases} (X_j^{\lambda_j} - 1)/\lambda_j, & \text{if } \lambda_j \neq 0; \\ \ln(X_j), & \text{if } \lambda_j = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Щоб отримати модель нелінійної регресії для RFC за (1), треба підставити RFC , $\hat{\lambda}_{RFC}$, $\hat{Z}_{RFC}$, Z_{CBO} , Z_{WMC} , ε_1 та σ_{ε_1} замість Y , $\hat{\lambda}_Y$, $\hat{Z}_Y$, Z_1 , Z_2 , ε та σ_ε відповідно. Щоб отримати модель нелінійної регресії для CBO за (1), нам потрібно підставити CBO , $\hat{\lambda}_{CBO}$, $\hat{Z}_{CBO}$, Z_{RFC} , Z_{WMC} , ε_2 та σ_{ε_2} замість Y , $\hat{\lambda}_Y$, $\hat{Z}_Y$, Z_1 , Z_2 , ε та σ_ε відповідно. Щоб отримати модель нелінійної регресії для WMC за (1), нам потрібно підставити WMC , $\hat{\lambda}_{WMC}$, $\hat{Z}_{WMC}$, Z_{RFC} , Z_{CBO} , ε_3 та σ_{ε_3} замість Y , $\hat{\lambda}_Y$, $\hat{Z}_Y$, Z_1 , Z_2 , ε та σ_ε відповідно [8].

Як і в [8], щоб обчислити квадрат відстані Махаланобіса (КВМ) для тривимірної точки нормалізованих даних (точка i), ми застосовуємо формулу

$$d_i^2 = (\mathbf{T}_i - \bar{\mathbf{T}})^T \mathbf{S}_N^{-1} (\mathbf{T}_i - \bar{\mathbf{T}}), \quad (3)$$

де $\mathbf{T}$ – вектор нормалізованих випадкових величин $\mathbf{T} = \{Z_{RFC}, Z_{CBO}, Z_{WMC}\}^T$;

$\bar{\mathbf{T}}$ – вектор вибірових середніх, $\bar{\mathbf{T}} = \{\bar{Z}_{RFC}, \bar{Z}_{CBO}, \bar{Z}_{WMC}\}^T$;

$\mathbf{S}_N$ – вибіркова коваріаційна матриця

$$\mathbf{S}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{T}_i - \bar{\mathbf{T}})(\mathbf{T}_i - \bar{\mathbf{T}})^T. \quad (4)$$

Відповідно до [8], ми будемо довірчі інтервали нелінійних регресій для метрик RFC, CBO та WMC як

$$\Psi_Y^{-1} \left(\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, \nu} S_{Z_Y} \left\{ \frac{1}{N} + (\mathbf{z}_X^+)^T \mathbf{S}_Z^{-1} (\mathbf{z}_X^+) \right\}^{1/2} \right). \quad (5)$$

де Ψ_Y – нормалізує перетворення для залежної змінної Y ;

$t_{\alpha/2, \nu}$ – квантиль t -розподілу Стюдента з рівнем значущості $\alpha/2$ та ν ступенями свободи, $\nu = N - 3$;

$\mathbf{z}_X^+$ – вектор з компонентами $Z_{1i} - \bar{Z}_1$ та $Z_{2i} - \bar{Z}_2$ для i -го рядка, $\bar{Z}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{ji}$,

$$j=1,2, S_{Z_Y}^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^N (Z_{Yi} - \hat{Z}_{Yi})^2;$$

$\mathbf{S}_Z$ – матриця 2×2

$$\mathbf{S}_Z = \begin{pmatrix} S_{Z_1 Z_1} & S_{Z_1 Z_2} \\ S_{Z_1 Z_2} & S_{Z_2 Z_2} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

де $S_{Z_q Z_r} = \sum_{i=1}^N [Z_{qi} - \bar{Z}_q][Z_{ri} - \bar{Z}_r]$, $q, r = 1, 2$.

Щоб побудувати довірчий інтервал нелінійної регресії для RFC за (5), потрібно підставити RFC , Ψ_{RFC} , $\hat{Z}_{RFC}$, Z_{CBO} , Z_{WMC} , $\bar{Z}_{CBO}$ та $\bar{Z}_{WMC}$ замість Y , Ψ_Y , $\hat{Z}_Y$, Z_1 , Z_2 , $\bar{Z}_1$ та $\bar{Z}_2$ відповідно. Щоб побудувати довірчий інтервал нелінійної регресії для CBO за (5), потрібно підставити CBO , Ψ_{CBO} , $\hat{Z}_{CBO}$, Z_{RFC} , Z_{WMC} , $\bar{Z}_{RFC}$ та $\bar{Z}_{WMC}$ замість Y , Ψ_Y , $\hat{Z}_Y$, Z_1 , Z_2 , $\bar{Z}_1$ та $\bar{Z}_2$ відповідно. Щоб побудувати довірчий інтервал нелінійної регресії для WMC за (5), потрібно підставити WMC , Ψ_{WMC} , $\hat{Z}_{WMC}$, Z_{RFC} , Z_{CBO} , $\bar{Z}_{RFC}$ та $\bar{Z}_{CBO}$ замість Y , Ψ_Y , $\hat{Z}_Y$, Z_1 , Z_2 , $\bar{Z}_1$ та $\bar{Z}_2$ відповідно [8].

Інтервал прогнозування нелінійної регресії будується аналогічно (5) з тією лише різницею, що до суми у фігурних дужках (5) потрібно додати ще 1.

Для побудови моделей у формі (1) ми використали дані з 124 веб-додатків, розміщених на GitHub для п'яти відомих фреймворків: CakePHP, CodeIgniter, Laravel, Symfony та Yii. Описова статистика цього набору даних наведена в [14]. Після видалення викидів з цих даних залишилися дані з 110 застосунків, описова статистика з яких наведена в таблиці 1.

Щоб уникнути проблеми оверфітінгу моделі, ми розділили вибірку даних на два набори: навчальний (60 точок даних) і тестовий (50 точок даних). Таблиця 2 містить описові статистики навчального та тестового наборів даних.

Оцінки параметрів трьох побудованих нелінійних регресійних моделей для метрик RFC, CBO та WMC у формі (1) наведені в таблиці 3.

Таблиця 1 – Описова статистика набору даних із 110 застосунків

Назва метрики	Min	Max	Середнє	СКВ
Number of classes	25	7743	491,600	946,931
RFC	3,00	20,98	10,413	3,757
CBO	1,68	8,72	4,382	1,593
WMC	1,75	67,83	14,301	14,568

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Описові статистики навчального та тестового наборів даних

Назва метрики	Min	Max	Середнє	СКВ	Min	Max	Середнє	СКВ
Number of classes	32	7743	655,467	1233,763	25	1496	282,960	283,544
RFC	3,00	20,98	10,518	4,468	6,31	16,47	10,287	2,708
CBO	1,68	8,72	4,506	1,792	2,00	6,59	4,233	1,318
WMC	1,75	67,83	15,849	16,733	2,73	43,73	12,444	11,265

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Оцінки параметрів нелінійних регресійних моделей

No	Y	$\hat{b}_0$	$\hat{b}_1$	$\hat{b}_2$	σ_ϵ	$\hat{\lambda}_y$
1	RFC	0,61548	-0,00200	1,29779	0,1369	0,04570
2	CBO	1,43051	-0,05220	0,47253	0,6991	0,38434
3	WMC	-0,34586	0,70983	0,00992	0,1013	-0,43498

Джерело: розроблено авторами

Для розрахунку значень KBM за (3) обернена матриця до матриці (4) є такою:

$$S_N^{-1} = \begin{pmatrix} 99,164 & -70,390 & -0,9834 \\ -70,390 & 54,238 & 0,1086 \\ -0,9834 & 0,1086 & 2,081 \end{pmatrix}$$

та вибірові середні $\bar{Z}_{RFC}$, $\bar{Z}_{CBO}$ та $\bar{Z}_{WMC}$ дорівнюють 1,366, 2,384 та 1,951 відповідно. Квантиль $F_{3,N-3,0.005}$ дорівнює 4,754 для $N=60$.

Щоб визначити довірчі інтервали та інтервали прогнозування нелінійних регресій для метрик RFC, CBO та WMC, обернені матриці до матриці (6) є такими:

$$S_Z^{-1} = \begin{pmatrix} 0,03468 & -0,01404 \\ -0,01404 & 0,13021 \end{pmatrix}, S_Z^{-1} = \begin{pmatrix} 0,90387 & -1,17231 \\ -1,17231 & 1,64499 \end{pmatrix}, S_Z^{-1} = \begin{pmatrix} 0,07122 & -0,00982 \\ -0,00982 & 0,03452 \end{pmatrix},$$

а значення S_{Z_y} дорівнюють 0,1393, 0,7112 та 0,1030 відповідно.

У всіх випадках обчислення границь довірчих інтервалів та інтервалів прогнозування необхідно використовувати в (5) $t_{0.05/2,57} = 2,002$, $N=60$ та $v=57$.

Щоб оцінити прогностичну точність нелінійних регресійних моделей для метрик RFC, CBO та WMC у формі (1), ми використали стандартні показники MMRE та PRED(0,25), граничні значення яких – не більше 0,25 і не менше 0,75 відповідно.

Для моделей у формі (1) із оцінками параметрів з таблиці 3 значення MMRE та PRED(0,25) для навчального і тестового наборів даних наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Значення MMRE та PRED(0,25)

No	Y	навчальний набір даних		тестовий набір даних	
		MMRE	PRED(0,25)	MMRE	PRED(0,25)
1	RFC	0,1040	0,9833	0,1386	0,8800
2	CBO	0,3729	0,4333	0,3181	0,6400
3	WMC	0,2563	0,5333	0,3295	0,4000

Джерело: розроблено авторами

Ці значення свідчать про задовільну якість моделей у формі (1). Крім того, ці значення вказують на прийнятну якість моделі (1) лише для метрики RFC. Останнє можна пояснити тим, що поділ всього набору даних на два (навчальний та тестовий) проводився з урахуванням побудови моделі (3) лише для метрики RFC.

Ми оцінили якість веб-додатків з відкритим кодом, розроблених із застосуванням фреймворків PHP, за побудованою математичною моделлю у вигляді довірчих інтервалів і інтервалів прогнозування нелінійних регресій для метрик RFC, CBO та WMC, використавши методику з [8]. Серед 60 веб-додатків навчального набору даних 13,33% мають високу (high) якість, 3,33% – середню (medium) і 83,33% – низьку (low) якість з точки зору ОО проектування. Серед 50 веб-додатків тестового набору даних 10% мають високу якість, 2% – середню і 88% – низьку якість.

Результати оцінювання якості для восьми веб-додатків з відкритим кодом, розроблених із застосуванням різних фреймворків PHP, наведено в таблиці 5, в якій значення KBM для нормалізованих метрик позначено як KBMH. Веб-додаток Crater (<https://github.com/crater-invoice-inc/crater>), створений за допомогою Laravel, має середню якість, оскільки значення RFC, CBO та WMC для нього знаходяться в межах усіх довірчих інтервалів нелінійних регресій для метрик RFC, CBO та WMC.

Три веб-додатки (Gymie, Attendize та Cachet) мають високу якість, оскільки точки даних (значення RFC, CBO та WMC) для цих програм знаходяться між верхніми межами довірчих інтервалів і нижніми межами інтервалів прогнозування для метрик RFC, CBO та WMC. Веб-додаток Gymie (<https://github.com/lubusIN/laravel-gymie>) створений за допомогою Laravel для керування спортзалом і клубом. Attendize (<https://github.com/Attendize/Attendize>) – це платформа з відкритим кодом для продажу квитків і керування подіями, створена на фреймворку Laravel. Cachet (<https://github.com/CachetHQ/Cachet>) – це система власно-розміщених статусних сторінок з відкритим вихідним кодом на основі фреймворку Laravel.

Таблиця 5 – Результати оцінювання якості для восьми веб-додатків

i	Назва застосунку	RFC	CBO	WMC	KBMH	якість
1	Gymie	7,41	3,52	4,87	0,12	high
2	Attendize	8,01	4,53	5,35	0,33	high
3	Cachet	6,57	4,47	3,85	1,04	high
4	Crater	8,76	4,49	6,48	0,09	medium
5	Craft	15,14	7,59	20,45	3,35	low
6	Crud	12,20	4,43	9,13	2,09	low
7	Sandbox	10,49	2,93	7,04	2,18	low
8	Wallabag	12,59	5,65	8,45	4,49	low

Джерело: розроблено авторами

Чотири веб-додатки (Craft, Crud, Sandbox і Wallabag) мають низьку якість, оскільки деякі точки даних (значення RFC, CBO та WMC) для цих програм знаходяться

між верхніми межами довірчих інтервалів і верхніми межами інтервалів прогнозування для метрик RFC, CBO та WMC. Craft (<https://github.com/craftcms/cms>) – це гнучка, зручна CMS на основі фреймворку Yii для створення власного цифрового досвіду в Веб та за його межами. Crud (<https://github.com/FriendsOfCake/crud>) створено на основі Yii, щоб використовувати його для розробки стероїдів і надати розробникам достатньо гнучкості, щоб використовувати його як для швидкого створення прототипів, так і для виробничих програм. Sandbox (<https://github.com/dereuromark/cakephp-sandbox>) – це веб-додаток для демонстрації функцій CakePHP, а також створення пісочниці для випробувань. Wallabag (<https://github.com/wallabag/wallabag>) – це веб-додаток на основі Symfony, який дозволяє зберігати веб-сторінки для подальшого читання.

Висновки. Удосконалено математичну модель у вигляді довірчих інтервалів та інтервалів прогнозування нелінійних регресій для метрик RFC, CBO та WMC на рівні застосунку для оцінювання якості ПЗ на основі тривимірного ПБК, яка на відміну від існуючих моделей дозволяє здійснювати відповідне оцінювання для веб-додатків з відкритим кодом, розроблених за допомогою PHP фреймворків.

Для побудови удосконаленої математичної моделі було сформовано вибірку даних з метрик RFC, CBO і WMC 110 веб-додатків, розроблених за допомогою п'яти відомих фреймворків (CakePHP, CodeIgniter, Laravel, Symfony і Yii), та розділено її на два набори: навчальний (60 точок даних) і тестовий (50 точок даних). Побудова удосконаленої математичної моделі за навчальним набором даних та перевірка її якості як за навчальним, так і за тестовим наборами даних дозволила уникнути проблеми оверфітінгу моделі при отриманні задовільних значень стандартних показників її якості MMRE та PRED(0,25).

Перспективи подальших розвідок у цьому напрямі можуть включати використання додаткових наборів даних для підтвердження або майбутнього удосконалення математичної моделі у вигляді довірчих інтервалів та інтервалів прогнозування нелінійних регресій для метрик RFC, CBO та WMC на рівні застосунку для оцінювання якості веб-додатків з відкритим кодом, розроблених із застосуванням PHP фреймворків.

Список літератури

1. Madaehoh A., Senivongse T. OSS-AQM: An open-source software quality model for automated quality measurement. *Data and Software Engineering (ICoDSE)* : proceedings. The 2022 International Conference. Denpasar, Indonesia: 2022. P. 126-131. DOI: 10.1109/ICoDSE56892.2022.9972135
2. Chen C., Shoga M., Boehm B. Exploring the dependency relationships between software qualities. *Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)* : proceedings. the 2019 IEEE 19th International Conference. Sofia, Bulgaria: 2019. P. 105-108. DOI: 10.1109/QRS-C.2019.00032
3. Bombiri O., Poda P., Ouedraogo T.F. Application of machine learning in software quality: a Mini-review. *Natural and Engineering Sciences for Sahel's Sustainable Development (MNE3SD)* : proceedings. The 2023 IEEE Multi-conference. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso: 2023. P. 1-7. DOI: 10.1109/MNE3SD57078.2023.10079800
4. Gao C., Luo W., Wang J. et al. Software quality evaluation model based on multiple linear regression and fuzzy comprehensive evaluation method. *Dependable Systems and Their Applications (DSA)* : proceedings. The 2022 9th International Conference. Wulumuqi, China: 2022. P. 383-389. DOI: 10.1109/DSA56465.2022.00058
5. Deshpande M.V., Soitkar A., Tripathi D. R. et al. Ensuring web application quality: The role of software testing as a form of quality assurance. *ICT in Business Industry & Government (ICTBIG)* : proceedings. The 2023 IEEE International Conference. Indore, India: 2023. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICTBIG59752.2023.10456277
6. Fizza K., Banerjee A., Jayaraman P.P. et al. A survey on evaluating the quality of autonomic Internet of things applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2023. Vol. 25, No. 1. P. 567-590. DOI: 10.1109/COMST.2022.3205377

7. Shyamal D.K.K., Asanka P.P.G.D., Wickramaarachchi D. A comprehensive approach to evaluating software code quality through a flexible quality model. *Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)* : proceedings. The 2023 International Research Conference. Kelaniya, Sri Lanka: 2023. P. 1-8. DOI: 10.1109/SCSE59836.2023.10215004
8. Prykhodko S. Evaluating quality of software systems by the confidence and prediction intervals of regressions for RFC, CBO, and WMC metrics. *WSEAS Transactions on Systems*. 2024. Vol. 23. P. 322-330. DOI: 10.37394/23202.2024.23.36
9. Chidamber S.R., Kemerer C.F. Towards a metrics suite for object oriented design. *ACM SIGPLAN Notices*. 1991. Vol. 26, Issue 11. P. 197–211. DOI: 10.1145/118014.117970
10. Brito e Abreu F., Melo W. Evaluating the impact of object-oriented design on software quality. *Software Metrics* : proceedings. The 3rd International Symposium. Berlin, Germany: 1996. P. 90-99. DOI: 10.1109/METRIC.1996.492446
11. Prykhodko S., Prykhodko N. A technique for detecting software quality based on the confidence and prediction intervals of nonlinear regression for RFC metric. *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* : proceedings. The 2022 IEEE 17th International Conference. Lviv, Ukraine: 2022. P. 499-502. DOI: 10.1109/CSIT56902.2022.10000532
12. Prykhodko S., Prykhodko N. Estimating quality of open-source Kotlin-based apps by the confidence and prediction intervals of nonlinear regression for RFC metric. *Computer Science and Information Technologies (CSIT)* : proceedings. The 2023 IEEE 18th International Conference. Lviv, Ukraine: 2023. P. 1-4. DOI: 10.1109/CSIT61576.2023.10324187
13. Saravanan N., Dharanya C., Dhina M. et al. A novel approach to predict the defect density in software application using linear regression algorithm. *Science Technology Engineering and Management (ICSTEM)* : proceedings. The 2024 International Conference. Coimbatore, India: 2024. P. 1-5. DOI: 10.1109/ICSTEM61137.2024.10560850
14. Prykhodko A.S., Malakhov E.V. Determining object-oriented design complexity due to the identification of classes of open-source web applications created using PHP frameworks. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024. Vol. 69, No. 2. P. 160–166. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-2-16

References

1. Madaehoh, A., & Senivongse, T. (2022). OSS-AQM: An open-source software quality model for automated quality measurement. *Data and Software Engineering (ICoDSE)*: proceedings of the 2022 International Conference (pp. 126-131). Denpasar, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/ICoDSE56892.2022.9972135>
2. Chen, C., Shoga, M., & Boehm, B. (2019). Exploring the dependency relationships between software qualities. *Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)*: proceedings of the 2019 IEEE 19th International Conference (pp. 105-108). Sofia, Bulgaria. <https://doi.org/10.1109/QRS-C.2019.00032>
3. Bombiri, O., Poda, P., & Ouedraogo, T.F. (2023). Application of machine learning in software quality: a Mini-review. *Natural and Engineering Sciences for Sahel's Sustainable Development (MNE3SD)*: proceedings of 2023 IEEE Multi-conference (pp. 1-7). Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. <https://doi.org/10.1109/MNE3SD57078.2023.10079800>
4. Gao C., Luo W., Wang J. et al. (2022). Software quality evaluation model based on multiple linear regression and fuzzy comprehensive evaluation method. *Dependable Systems and Their Applications (DSA)*: proceedings of the 2022 9th International Conference (pp. 383-389). Wulumuqi, China. <https://doi.org/10.1109/DSA56465.2022.00058>
5. Deshpande, M.V., Soitkar, A., Tripathi, D. R. et al. (2023). Ensuring web application quality: The role of software testing as a form of quality assurance. *ICT in Business Industry & Government (ICTBIG)*: proceedings of the 2023 IEEE International Conference (pp. 1-6). Indore, India. <https://doi.org/10.1109/ICTBIG59752.2023.10456277>
6. Fizza, K., Banerjee, A., Jayaraman, P.P. et al. (2023). A survey on evaluating the quality of autonomic Internet of things applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 1 (25), 567-590. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3205377>
7. Shyamal, D.K.K., Asanka, P.P.G.D., & Wickramaarachchi, D. (2023). A comprehensive approach to evaluating software code quality through a flexible quality model. *Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)*: proceedings of the 2023 International Research Conference (pp. 1-8). Kelaniya, Sri Lanka. <https://doi.org/10.1109/SCSE59836.2023.10215004>

8. Prykhodko, S. (2024). Evaluating quality of software systems by the confidence and prediction intervals of regressions for RFC, CBO, and WMC metrics. *WSEAS Transactions on Systems*, 23, 322-330. <https://doi.org/10.37394/23202.2024.23.36>
9. Chidamber, S.R., & Kemerer, C.F. (1991). Towards a metrics suite for object oriented design. *ACM SIGPLAN Notices*, 11 (26), 197–211. <https://doi.org/10.1145/118014.117970>
10. Brito e Abreu, F., Melo, W. (1996). Evaluating the impact of object-oriented design on software quality. *Software Metrics: proceedings of the 3rd International Symposium* (pp. 90-99). Berlin, Germany. <https://doi.org/10.1109/METRIC.1996.492446>
11. Prykhodko, S., & Prykhodko, N. (2022). A technique for detecting software quality based on the confidence and prediction intervals of nonlinear regression for RFC metric. *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT): proceedings of the 2022 IEEE 17th International Conference* (pp. 499-502). Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000532>
12. Prykhodko, S., & Prykhodko, N. (2023). Estimating quality of open-source Kotlin-based apps by the confidence and prediction intervals of nonlinear regression for RFC metric. *Computer Science and Information Technologies (CSIT): proceedings of the 2023 IEEE 18th International Conference* (pp. 1-4). Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324187>
13. Saravanan, N., Dharanya, C., Dhina, M. et al. (2024). A novel approach to predict the defect density in software application using linear regression algorithm. *Science Technology Engineering and Management (ICSTEM): proceedings of the 2024 International Conference* (pp. 1-5). Coimbatore, India. <https://doi.org/10.1109/ICSTEM61137.2024.10560850>
14. Prykhodko, A.S., Malakhov, E.V. (2024). Determining object-oriented design complexity due to the identification of classes of open-source web applications created using PHP frameworks. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2 (69), 160–166. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-2-16>

Andriy Prykhodko, Eugene Malakhov, Prof., DSc.

Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

An Improved Mathematical Model for Assessing the Quality of Open Source Web Applications

The problem of assessing the quality of the open-source software, including web applications developed using the PHP frameworks, is important because nowadays the popularity of open-source software is growing, and web application development is performed using frameworks. The object of the study is the process of assessing the quality of open-source web applications developed using PHP frameworks, using software metrics RFC (Response for Class), CBO (Coupling Between Objects), and WMC (Weighted Methods per Class). The subject of the study is the mathematical models to evaluate the quality of the open-source web applications developed using the PHP frameworks, using the software metrics RFC, CBO, and WMC.

The objective of the paper is to improve a mathematical model for assessing the quality of open-source web applications developed using PHP frameworks, which will allow us to increase the confidence to determine the quality of these applications according to the software metrics RFC, CBO, and WMC.

Methodology. To construct the specified mathematical model, we use methods of nonlinear regression analysis based on multivariate normalizing transformations. As a multivariate normalizing transformation, we apply the three-variate Box-Cox transformation, the parameter estimates of which are computed using the maximum likelihood method.

The scientific novelty of this study lies in the improvement of the mathematical model in the form of confidence and prediction intervals of nonlinear regressions for RFC, CBO, and WMC metrics at the application level for software quality assessment based on the three-variate Box-Cox transformation, which, unlike existing models, allows for appropriate assessment for open-source web applications developed using PHP frameworks.

The results obtained have scientific and practical significance for assessing the quality of open-source web applications developed using such well-known PHP frameworks as CakePHP, CodeIgniter, Laravel, Symfony, and Yii, according to data from their RFC, CBO, and WMC software metrics and can be used for further development of new models and algorithms for assessing the quality of web applications.

mathematical model, quality, software, web application, normalizing transformation, nonlinear regression, software metric

Одержано (Received) 24.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025

UDC 004.94:004.052:004.415

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.38-44](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.38-44)Olena Shyshatska¹, PhD phys. and math. sci., Liubomyr Matiichuk², DSc., Andrii Shyshatskyi¹¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine²Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

e-mail: shyshatska@knu.ua, mlpstat@gmail.com, ashyshatskyi@knu.ua

Specification and Verification of a Formal Model for a Real-Time System Using TLA+

The paper describes theoretical and applied aspects of modeling real-time information systems using the example of a continuous glucose monitoring (CGM) system. The primary focus is on the application of formal methods, in particular the TLA+ specification language and modal logics, which ensure mathematical precision in describing system behavior. A formal model of the CGM system is constructed, safety invariants are defined, and automated model verification is performed using the TLC mechanism. The obtained results can be used to improve the reliability and justify the correctness of software-hardware solutions in the field of medical IT systems, particularly Closed-Loop Systems (CLS), which currently lack appropriate regulatory certification. The proposed approach contributes to the formalization of the validation process for such systems in accordance with standards for safety-critical software.

real-time systems, CGM, model, formal design methods, specification, verification, TLA+

Problem Statement. Continuous glucose monitoring (CGM) systems belong to the class of real-time software-hardware systems operating in sensitive medical environments. Such systems are characterized by stringent requirements for accuracy, performance, safety, and the handling of large volumes of data, which aligns fully with the typical characteristics of critical IT systems [1]. Ensuring the reliable operation of such systems is a key prerequisite for their use in the medical domain.

Despite the widespread adoption of CGM devices in clinical practice, a number of unresolved technical challenges remain. These include ensuring measurement accuracy, proper real-time event handling, adaptation to individual usage scenarios, and the lack of formal certification for certain components within Closed-Loop Systems (CLS). Many CLS implementations lack official certification, which increases the risks for end users.

Formal methods, particularly the use of specification languages such as TLA+ (Temporal Logic of Actions) [2, 3], make it possible to describe the behavior of IT systems, define invariants, formally verify safety and performance properties, and detect design errors at early development stages, thereby reducing the cost of their correction. However, despite the existence of general theoretical frameworks, there remains a need for applied research that demonstrates the practical application of formal methods across the full development cycle of medical software-hardware IT systems. This necessity determines the relevance of the present study.

The aim of the study is to develop a formal model of a CGM system using the TLA+ specification language and to verify its properties in terms of invariance, safety, and correctness of state transitions.

To achieve this goal, the following tasks must be completed:

1. Analyze the technical requirements for CGM as a real-time system;
2. Justify the choice of TLA+ as a formal means of describing system behavior;
3. Develop a formal specification of the monitoring model, including key invariants;
4. Perform automated verification using the TLC mechanism;
5. Assess the practical effectiveness of the approach based on experimental scenarios.

Review of Recent Research and Publications. Continuous glucose monitoring (CGM) systems belong to the class of safety-critical software-hardware complexes operating

in real-time environments. They are used in medical settings and are characterized by stringent requirements for accuracy, performance, and safety. The design of such systems becomes particularly complex in the context of Closed-Loop Systems (CLS), which automate insulin delivery. While commercial solutions are steadily improving, a significant portion of the market is occupied by DIY systems, which are not subject to certification and therefore pose additional risks.

Despite advances in the hardware components of CGM systems, the issues of formal modeling and verification of their software behavior remain underexplored. In [1], the authors highlight the limitations of traditional testing in the context of safety-critical IT systems, as not all errors can be detected empirically. They propose a multi-level verification strategy based on constructing specifications using formal languages, notably Z.

An early example of applying formal methods to glucose monitoring systems is presented in [2], which proposes a top-down approach to the design of insulin systems using atomic coordinated actions. The development was carried out within the CAA-DRIP (Computer Aided Architecture – Distributed Real-time Implementation Platform) environment, which supports formal system modeling.

In this context, interest in formal development languages is growing, particularly the TLA+ (Temporal Logic of Actions) language developed by L. Lamport [3]. TLA+ allows for the description of parallel, sequential, and reactive behaviors of IT systems, as well as verification of their properties using the TLC Model Checker. Practical aspects of planning and verifying invariants in TLA+ are detailed in [4]. The theoretical foundation of TLA+ lies in temporal and modal logics [5], which enable the formal specification of temporal properties such as obligation, possibility, and event succession. The foundational aspects of these logics are elaborated in [5–6], and their application to the control of dynamic systems is illustrated in [4]. All these approaches contribute to the development of verifiable behavioral models for complex real-time IT systems.

Examples of the effective use of TLA+ are presented in [9], where the language is employed at AWS to verify the consistency and correctness of distributed storage systems, and in [10], which demonstrates the application of formal methods in the design of embedded systems with guaranteed safety properties. A comprehensive overview of the implementation of formal methods in critical IT domains is provided in [11], which examines experiences in the transportation, aviation, and financial sectors.

However, the application of TLA+ to the design of medical IT systems, particularly CGM/CLS, remains limited. This creates an open niche for further research.

Thus, the current literature confirms the existence of powerful formal method toolkits in computer science, including TLA+, yet their application to glucose monitoring systems has not become widespread. This underlines the need for applied developments focused on the formal specification and verification of CGM system behavior in real-time operation.

Problem Definition. This study sets out the task of developing an adaptive formal model of a glucose monitoring system that can be adjusted to meet the specifications of specific CGM solutions. The developed second-generation CGM model is implemented in the TLA+ language and is designed to be scalable for integration into Closed-Loop Systems (CLS).

The proposed approach enables: formal verification of algorithms in DIY-type CLS systems, thereby increasing their reliability; the development of unified criteria for certifying such medical IT solutions; and the optimization of component integration between CGM and CLS, ensuring more effective insulin therapy management for users.

Main Content. Modeling a CGM system requires tools for the formal description of its behavior across different temporal frames, as well as for the specification of functional requirements. Temporal modal logic is an optimal choice for modeling system behavior, as it specializes in working with time-based models [7–10]. Alethic logic is used for the formalization of system requirements, as it provides sufficient expressive power for system

specification and verification. It is worth noting that modern development environments support both alethic and temporal logics, facilitating their use in the modeling process.

The modeling language must meet a number of requirements specific to CGM as a real-time software-hardware system. In particular, the language should:

1. Possess a formal semantics that ensures unambiguous specifications and enables mathematical verification;
2. Support both temporal and alethic logics;
3. Be suitable for modeling behavior within temporal spaces;
4. Provide tools for the formal verification of invariants and properties;
5. Ensure scalability, i.e., the ability of the model to adapt to more complex architectures (e.g., CLS systems);
6. Remain sufficiently simple for development and testing.

Several commonly used specification and modeling languages were considered—TLA+, UML, SysML, and Promela. Each has its advantages; however, TLA+ [2–3] proved to be the most suitable based on the defined criteria.

TLA+ integrates the description of variables, actions, temporal constraints, and invariants within a single formal paradigm. Specifications in TLA+ allow for the definition of system behavior in the form of temporal formulas that express necessary or permitted transitions between system states, while the TLC tool enables automated verification of these properties.

Developing a model in TLA+ involves the formalization of system behavior using temporal logic formulas. The TLA+ syntax supports a precise and structured description of system functionality—incorporating variables, actions, and temporal properties [3].

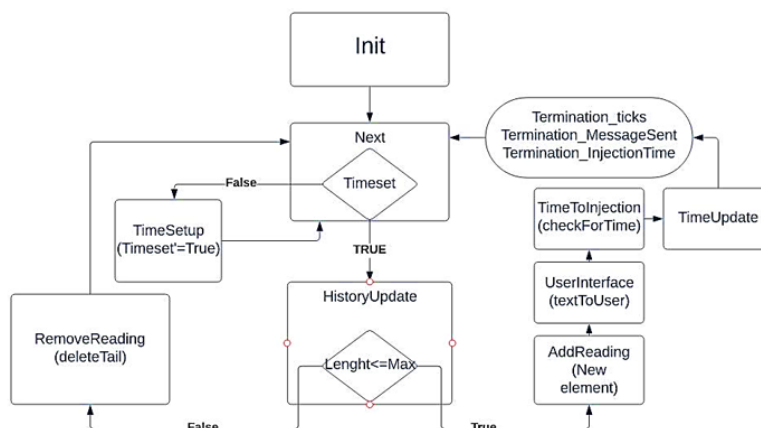


Figure 1 – Diagram of the Glucose Monitoring System Model

Source: developed by the authors

The model includes the following components:

1. Variables describing the system state: blood glucose level; indicators of glucose level exceeding permissible limits; amount of carbohydrates entering the bloodstream; alerts for insulin administration; informational messages for the user; timestamp of alerts; glucose level thresholds; critical states triggering emergency alerts; current time.

2. Actions that define CGM functionality, including: glucose level measurement; checking insulin administration time; generating user alerts; adding new glucose readings; removing outdated data; updating the current time.

3. Key constraints and invariants: limiting the number of steps in the system; controlling glucose levels within defined thresholds; guaranteeing the existence and dispatch of user notifications.

One of the main advantages of TLA+ is its capability to analyze system behavior at a high level of abstraction. This enables the validation of system performance across different scenarios and ensures compliance with specifications.

Based on the defined requirements, a model diagram was developed, serving as the foundation for its implementation in TLA+.

In the diagram, rectangles represent functions, diamonds denote conditions, and rounded rectangles correspond to system requirements. The operation of the system begins with the initialization of initial variables in the Init function, which are then passed to the Next function. In the first step, the system time is set and subsequently fixed (as CGM systems typically operate over a two-week period, resetting the time is not required). The system then updates based on new glucose level values. If the measurement history exceeds the allowable length, older entries are deleted; otherwise, a new entry is added, a user notification is sent, followed by a check of the time for insulin administration and an update of the current time. In the final stage, the system's requirements are verified, and if all conditions are satisfied, the system proceeds to the next step.

The model was developed using TLA Toolbox – the official IDE for TLA+, created by Leslie Lamport and the Microsoft Research team [10]. In the CGM model, user-defined parameters – such as glucose threshold values or insulin notification times – are treated as constants. The rationale behind this approach is threefold: (1) the parameters remain unchanged during system operation, ensuring modeling accuracy and verification reliability; (2) ease of modification – using constants enables testing the system under various conditions without altering the core model; (3) formal specification – specification languages are intended for formally describing system behavior, not for runtime user input during model checking.

To optimize the model and reduce verification load, several simplifications were introduced. These do not affect verification correctness but significantly lower computational cost: (1) the glucose level is represented as an integer value; (2) a maximum glucose level is defined to constrain the value range; (3) the time logging function is simplified, since its computation is resource-intensive, and in real systems, these parameters are user-provided, eliminating the need for step-by-step verification.

This approach allows for efficient modeling of CGM behavior and ensures its formal verification using TLA+.

The developed model includes the following key components [11]:

1. Initialization of variables and constants – the necessary parameters are defined, including: `currentLength` – the number of entries in the glucose level history; `currentTicks` – the number of executed steps (in most real-world models, the terminal state is determined by a time limit of two weeks, corresponding to the sensor's lifespan); `message` and `reminder` – user notification and reminder to administer insulin; `IsBad`, `IsCritical` – Boolean variables indicating whether the glucose level is outside the normal range or has reached critical values.

2. Initialization of the initial state and transitions: the Init function sets the initial values of the variables; the Next function defines the possible system transitions: at the first step, the initial time is set, and subsequent transitions are implemented in the HistoryUpdate function.

3. Functional modules of the model: `TimeSetup` sets a fixed time as a constant and changes `TimeSet` to true, preventing further calls to this function; `HistoryUpdate` adds a new glucose reading, generates messages, and checks whether it is time to remind the user to administer insulin. If the allowed history length is exceeded, the oldest entry is deleted; `RemoveReading` deletes the oldest reading if the history exceeds the predefined length; `AddReading` adds a new glucose level reading and increases `currentTicks` to simulate system operation over time; `UserInterface` generates user messages based on glucose levels and sets `IsBad` and `IsCritical` values to alert the user or their relatives in case of critical glucose changes. If sensor data is unavailable, `IsBad` is set to true, signaling a read error; `SendMessage` generates the message text according to the provided parameters; `TimeToInjection` checks whether the current time matches the predefined insulin administration time. If the condition is met, `SendReminder` is set to true, triggering a reminder

for the user. Afterwards, TimeUpdate updates the time, since glucose level measurements by the sensor are typically performed every minute, making second-level precision unnecessary.

4. Temporal formulas for execution correctness control: Termination_Ticks – defines process termination if the number of performed actions exceeds the predefined limit; Termination_MessageSent – ensures that once a message has been sent, the user will not receive empty notifications; Termination_InjectionTime – checks whether the user has received a reminder to administer insulin; if the message content is absent, the condition is automatically considered satisfied.

To verify the correctness of the constructed model, the TLC Model Checker, part of the TLA+ Toolbox, was used. The model was verified with various sets of parameters, which included changes to MaxGlucose, MaxHistoryLength, and MaxTicks – the key variables with the greatest impact on the model's computational complexity. MaxGlucose defines the maximum glucose value that can be represented in the system. MaxHistoryLength determines the length of the stored measurement history. MaxTicks defines the number of time units during which the system must function.

The model was tested under various input parameter values, some of which are presented in Table 1. Note: Due to the specifics of specification languages, glucose level is represented as an integer value, as the current stage of the study focuses on analyzing the general system behavior across different glucose level zones.

Table 1 – model verification results

CGM system model					
system configuration				computational time	number of states
	MaxGlucose	MaxHistory Length	MaxTicks		
1	10	1	2000	00:00:15	$1.15 * 10^6$
2	20	1	2000	00:01:07	$1.9 * 10^7$
3	20	3	2000	Out Of Memory	
4	10	3	200	00:00:28	$5.7 * 10^7$
5	20	3	200	00:19:234	$7.5 * 10^7$
6	CONST	5	2000	00:00:05	$8.3 * 10^4$
7	10	5	20	00:15:17	$4.6 * 10^7$

Source: developed by the authors

The results of verifying the developed CGM model in TLA+ confirmed its correctness and compliance with the specified formal requirements. In particular, the specification contains no deadlock states, and all verified temporal formulas hold within the defined state space. Among the properties tested were the presence of user notifications, the system's response to critical deviations in glucose levels, and timely transitions between the system's key operational modes.

The developed model represents a foundational stage in the formal verification of CGM systems and demonstrates the potential of applying formal methods to the modeling of mission-critical IT systems. The primary practical purpose of the model is to verify the correctness of the notification logic in a simplified CGM system, which automates glucose monitoring and reduces the psychological burden on patients. Even in this simplified form, the model contributes to improving the quality of life for individuals with diabetes by reducing the need for manual measurements and ensuring timely responses to changes in glucose levels.

Based on the results obtained and the current structure of the formalized model, several directions for further extension have been identified:

1. Implementation of algorithms for analyzing glucose trend dynamics;

2. Integration of machine learning methods for glucose level prediction based on historical data;
3. Consideration of additional influencing factors (physical activity, stress, nutrition, etc.);
4. Development of mechanisms for detecting hypo-/hyperglycemia with appropriate warning logic;
5. Integration with insulin pumps as part of a closed-loop system (CLS) model.

Future extensions of the formal analysis may include the use of other logics (e.g., multivalued or modal) as well as verification of more complex properties such as liveness and fault recovery.

Overall, the CGM model in TLA+ is a promising tool for further research in diabetes management and opens up broad opportunities for improving and optimizing glucose monitoring systems.

Conclusions. As part of this study, an adaptive model of a Continuous Glucose Monitoring (CGM) system was developed, which can be flexibly configured to meet the specifications of particular systems under verification [14]. Formal methods, particularly modal logics (temporal and alethic), were employed as a universal toolkit to provide a mathematically rigorous description of properties such as necessity, possibility, and temporal dependence. The model was implemented in the TLA Toolbox—an official integrated development environment for the TLA+ specification language.

The developed specification models the core functional components of a second-generation CGM system, including temporal constraints, safety invariants, user notification logic, and measurement history retention. The use of TLA+ enabled a formal definition of system behavior in a temporal context, ensured the verification of invariants, and facilitated automated functional verification using the TLC Model Checker.

Verification results confirmed the correctness of the model: it contains no deadlock states and satisfies all defined temporal properties, thus ensuring its stability and reliability under various operating scenarios. Notably, the model implements automated logic for notifying users of critical glucose level deviations, which reduces the cognitive burden on users and improves the quality of life for individuals with diabetes.

The proposed modular structure of the model is extendable and scalable to the level of closed-loop systems (CLS), which include automated insulin delivery control. Promising directions for further development include:

List of References

1. Rafeh, R., Rabiee, A. Towards the design of safety-critical software. *Journal of Applied Research and Technology*. 2013. Vol. 11. P. 683–694.
2. Capozucca, A., Guelfi, N. The fault-tolerant insulin pump. *Rigorous Development of Complex Fault-Tolerant Systems*. Berlin : Springer-Verlag, 2006. P. 59–75.
3. Lamport, L. *Specifying systems: The TLA+ language and tools for hardware and software engineers*. Boston : Addison-Wesley Professional, 2002. 384 p.
4. Wayne, H. *Practical TLA+: Planning driven development*. New York : Apress, 2018. 221 p.
5. Fainekos, G., Kress-Gazit, H., Pappas, G. Temporal logic motion planning for mobile robots. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, 2005. P. 2020–2025.
6. Humberstone, L. *Philosophical applications of modal logic*. London : College Publications, 2016. 588 p.
7. Kripke, S. Semantical considerations for modal logics. *Acta Philosophica Fennica*. 1962. Helsinki. 389 p.
8. Guéron, J. *Time and modality*. (Studies in Natural Language and Linguistic Theory ; Vol. 75). Dordrecht : Springer, 2008. 316 p.
9. Newcombe, C., Rath, T., Zhang, F. et al. How Amazon Web Services uses formal methods. *Communications of the ACM*. 2015. Vol. 58, No. 4. P. 66–73.
10. Henzinger, T. A., Sifakis, J. The discipline of embedded systems design. *IEEE Computer*. 2006. Vol. 39, No. 10. P. 36–44.
11. Woodcock, J., Larsen, P. G., Bicarregui, J., Fitzgerald, J. Formal methods: Practice and experience. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2009. Vol. 41, No. 4. Article No. 19. P. 1–3.
12. Blood glucose monitoring model: specification and verification. *Github: веб-сайт*. URL: https://github.com/AndrewShysh/TLAPLUS_CGM_System/tree/main (дата звернення: 15.02.2025).

References

1. Rafeh, R., & Rabiee, A. (2013). Towards the design of safety-critical software. *Journal of Applied Research and Technology*, 11, 683–694.
2. Capozucca, A., & Guelfi, N. (2006). The fault-tolerant insulin pump. In *Rigorous Development of Complex Fault-Tolerant Systems* (pp. 59–75). Berlin: Springer-Verlag.
3. Lamport, L. (2002). *Specifying systems: The TLA+ language and tools for hardware and software engineers*. Boston: Addison-Wesley Professional.
4. Wayne, H. (2018). *Practical TLA+: Planning driven development*. New York: Apress.
5. Fainekos, G., Kress-Gazit, H., & Pappas, G. (2005). Temporal logic motion planning for mobile robots. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 2020–2025). Barcelona: IEEE.
6. Humberstone, L. (2016). *Philosophical applications of modal logic*. London: College Publications.
7. Kripke, S. (1962). Semantical considerations for modal logics. *Acta Philosophica Fennica*, Helsinki, 389.
8. Guéron, J. (2008). *Time and modality* (Studies in Natural Language and Linguistic Theory; Vol. 75). Dordrecht: Springer.
9. Newcombe, C., Rath, T., Zhang, F., et al. (2015). How Amazon Web Services uses formal methods. *Communications of the ACM*, 58(4), 66–73.
10. Henzinger, T.A., & Sifakis, J. (2006). The discipline of embedded systems design. *IEEE Computer*, 39(10), 36–44.
11. Woodcock, J., Larsen, P.G., Bicarregui, J., & Fitzgerald, J. (2009). Formal methods: Practice and experience. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 41(4), Article 19, 1–3.
12. AndrewShysh. (2025, February 15). *Blood glucose monitoring model: Specification and verification* [GitHub repository]. GitHub. https://github.com/AndrewShysh/TLAPLUS_CGM_System/tree/main.

О. В. Шишацька¹, канд. фіз.-мат. наук, Л. П. Матійчук², доц. д-р екон. наук, А. В. Шишацький¹

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

Специфікація та верифікація формальної моделі системи реального часу із використанням TLA+

У роботі представлено розробку формальної моделі програмно-апаратної системи реального часу на прикладі системи безперервного моніторингу рівня глюкози (Continuous Glucose Monitoring, CGM). CGM-системи є критично важливими ІТ-рішеннями, що використовуються в медичному середовищі для постійного вимірювання рівня глюкози в крові та своєчасного сповіщення користувачів. З огляду на дедалі ширше впровадження CGM у замкнені контури керування (Closed-Loop Systems, CLS), які автоматизують введення інсуліну, зростає потреба у забезпеченні коректності таких систем, особливо враховуючи популярність неперевіраних рішень, створених користувачами самостійно (DIY). Попри досягнення в галузі фізичних та сенсорних технологій, програмне забезпечення CGM-систем часто не має формальних специфікацій та перевірок. Це створює ризики у передбачуваності, безпеці та надійності, що є особливо критичними у медичних застосуваннях. Метою дослідження є застосування формальних методів, зокрема TLA+, для специфікації, моделювання та верифікації поведінки CGM-системи, що функціонує в режимі реального часу.

Запропонована модель описує основні компоненти CGM-системи: цикли вимірювання в часі, збереження історичних даних, виявлення перевищень порогових значень і логіку сповіщення. Також модель фіксує інваріанти системи, зокрема правильну послідовність переходів між станами та своєчасне генерування сповіщень. Для реалізації обрано TLA+, що ґрунтується на темпоральній та модальній логіці, підтримує моделювання конкурентних та реактивних систем і має потужні інструменти, зокрема перевірку моделей TLC. Модель реалізовано за допомогою TLA+ Toolbox і TLC. Розглянуто кілька конфігурацій (порогові значення глюкози, довжина історії, тривалість роботи системи) для оцінки її стійкості. Результати верифікації засвідчили відсутність тупикових станів і виконання всіх заданих властивостей безпеки. Це підтверджує доцільність використання формального моделювання в TLA+ для коректності CGM-систем, особливо в умовах, де критичними є безпечність, правильність та відслідковуваність. Модульна структура моделі забезпечує можливість її подальшого розширення — включення алгоритмів машинного навчання для прогнозування рівня глюкози, моделювання впливу фізичної активності або харчування, а також поступовий перехід до повністю автономних CLS-середовищ. Крім того, ця робота сприяє поширенню практик формальної специфікації в комп'ютерних науках, зокрема в галузі систем реального часу та критично важливих застосунків.

системи реального часу, CGM, модель, формальні методи проєктування, специфікація, TLA+, верифікація

Одержано (Received) 17.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 27.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.421.2:519.7

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.45-51](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.45-51)**К. В. Будат, Л. Я. Мартинович***Одеський національний університет імені І.І.Мечникова, м. Одеса, Україна**e-mail: budat.kateryna@stud.onu.edu.ua, larysa.yaroslavna@onu.edu.ua*

Синтез трійкових двовходових логічних функцій із використанням багатопорогового логічного елементу

У статті розглянуто метод синтезу трійкових бінарних логічних функцій із використанням багатопорогового елемента. Проведено порівняльний аналіз трійкової та двійкової логіки, розроблено алгоритм синтезу трійкових функцій і реалізовано програмний модуль для автоматизації цього процесу. Результати дослідження відкривають нові можливості для розвитку трійкової логіки в енергоефективних та швидкодіючих обчисленнях.

трійкова логіка, багатопороговий елемент багатозначної логіки, пороговий елемент трійкової логіки, трійковий логічний елемент, багатозначна логіка

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку обчислювальної техніки та зростання вимог до швидкодії, енергоефективності та надійності цифрових систем виникає необхідність дослідження альтернативних логічних основ, зокрема багатозначної логіки. Одним із найбільш перспективних напрямів є трійкова логіка, яка передбачає використання трьох логічних станів замість двох у класичній бінарній логіці. Такий підхід дозволяє підвищити щільність представлення інформації, зменшити кількість необхідних логічних елементів та потенційно скоротити час обробки даних. Особливу увагу до цього напрямку привертає те, що класичні бінарні апаратні засоби, які домінували протягом останніх десятиліть, поступово досягають своїх фізичних меж. У зв'язку з цим виникає потреба пошуку нових архітектур і логічних підходів, здатних забезпечити подальший розвиток обчислювальної техніки.

Незважаючи на потенційні переваги, синтез трійкових логічних функцій є значно складнішим у порівнянні з двійковими, з огляду на збільшену кількість можливих комбінацій входів і виходів. Зокрема, проблема автоматичного синтезу трійкових бінарних функцій потребує розробки спеціалізованих алгоритмів і програмних засобів, здатних забезпечити ефективний аналіз і побудову відповідних логічних структур.

Актуальність цієї задачі обумовлюється декількома чинниками. По-перше, трійкова логіка відкриває нові можливості для створення більш компактних і гнучких цифрових пристроїв. По-друге, вона дозволяє реалізувати нові принципи обробки інформації, які краще відповідають сучасним викликам — як з точки зору продуктивності, так і з точки зору енергоспоживання. По-третє, з наукової точки зору, дослідження в цій галузі сприяють поглибленню розуміння принципів побудови обчислювальних систем і створюють підґрунтя для майбутніх проривів у галузі електроніки та інформатики [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У зв'язку з посиленням інтересом наукової спільноти до альтернативних логічних основ, зокрема до трійкової логіки, останніми роками було опубліковано низку праць, присвячених розробці як теоретичних,

так і прикладних аспектів побудови багатозначних логічних схем. Вони охоплюють різні підходи до реалізації трійкових елементів, включаючи нанотехнології, а також спеціалізовані електронні компоненти, серед яких особливе місце займає багатопороговий логічний елемент.

У статті [2] розглядається використання Graphene Nano Ribbon Field Effect Transistor (GNRFET) для реалізації трійкових логічних та арифметичних схем. Автори підкреслюють, що GNRFET має унікальні властивості, які дають змогу контролювати порогову напругу, що є ключовим для багатозначної логіки (MVL). Вони запропонували новий підхід до проектування трійкових логічних воріт та схем, таких як інвертори, NAND, NOR, трійковий декодер, мультиплексор і напівсуматор.

Особливо важливими є дослідження, що ґрунтуються на багатопороговому елементі багатозначної логіки (БПЕБЛ) [3]. Цей елемент, завдяки своїй гнучкості та можливості реалізовувати різноманітні логічні функції в залежності від порогових значень і комбінацій виходів, став основою для створення більш складних компонентів, таких як трійковий півсуматор [4], суматор [5], тригер [6] та універсальний пристрій для побудови унарних трійкових операцій [7]. В [8] показано, що такий підхід дозволяє простіше створювати різні трійкові логічні елементи, використовуючи один універсальний принцип.

Розробка програмного забезпечення для синтезу двовходових трійкових функцій, яку буде представлено в межах цієї роботи, базується саме на використанні багатопорогового елемента як структурної основи.

Загалом, аналіз сучасних наукових і технічних джерел дозволяє зробити висновок про наявність стійкої тенденції до розвитку трійкових логічних систем, де багатопороговий елемент виступає не лише як функціональна одиниця, а як ключова технологічна платформа для подальших досліджень і розробок.

Постановка завдання. Мета наукової статті полягає в розробці методу синтезу трійкових бінарних логічних функцій із використанням багатопорогового елемента. Для цього необхідно вирішити такі задачі: 1) провести порівняльний аналіз функцій трійкової і двійкової логіки; 2) розробити алгоритм синтезу трійкових бінарних логічних функцій з використанням багатопорогового елемента; 3) реалізувати програмний модуль синтезу та провести тестування роботи створеного програмного забезпечення.

Виклад основного матеріалу. Трійкові системи досліджуються ще з 1950-х років. Проте розвиток двійкових комп'ютерів, що стали домінуючими впродовж наступних десятиліть, витіснив інтерес до трійкової логіки. Останнім часом інтерес до трійкових систем знову зріс, зокрема через їхній потенціал у галузях, що потребують високої щільності обчислень і зниження енергоспоживання.

Трійкова логіка має низку переваг над двійковою. Вона потребує приблизно на 36.9% менше операцій, що підвищує загальну ефективність обчислень. Завдяки здатності кодувати більше інформації в одному логічному елементі, трійкові системи зменшують обсяг необхідної пам'яті. Також вони дозволяють створювати компактніші логічні схеми з меншою кількістю елементів і мають потенціал до зниження енергоспоживання за рахунок меншої кількості переходів між логічними станами [9]. Все це робить трійкову логіку перспективною альтернативою традиційній двійковій.

У цій роботі реалізація трійкових логічних елементів базується на використанні БПЕБЛ у його чотирьохпороговій версії з 8 струмовими перемикачами. Якщо на вході струмового перемикача (СП) присутній активний сигнал, струм формується на виході L цього СП. У протилежному випадку струм генерується на виході R. Таким чином, через

комбінацію сигналів на виходах RL можливо реалізувати необхідну логічну поведінку. Ці сигнали додаються з урахуванням їхніх знакових значень [10].

Розроблений алгоритм побудови на основі чотирьохпорогового БПЕБЛ можна формалізувати у наступному вигляді:

1. Для кожної можливої комбінації вхідних змінних (a,b) визначається значення суми вхідних сигналів *terlev* [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Значення *terlev* може набувати одного з п'яти рівнів: «-», «-», «0», «+», «++».

2. Значення функції *f* розбивається на три підмножини: ті комбінації (a,b), для яких $f(a,b)=-$; ті, де $f(a,b)=0$; та ті, де $f(a,b)=+$.

3. Згідно з таблицею відповідності між значеннями *terlev* та активними вихідними сигналами перемикачів, для кожного рівня функції («-», «0», «+») відбираються відповідні виходи:

- для рівня «+» — виходи, що формують позитивний сигнал при потрібних значеннях *terlev* (+R1, +R2, +L2, +L1),
- для рівня «-» — виходи, які генерують від'ємний сигнал при відповідних *terlev* (-R1, -R2, -L2, -L1),
- для рівня «0» — виходи формують нульовий рівень або відсутність активного сигналу.

4. Якщо виявляється, що обраний вихідний сигнал, який забезпечує правильне значення функції для певної комбінації вхідних змінних, водночас спотворює значення функції для іншої комбінації, вживаються заходи компенсації. У такому випадку додається додатковий вихід струмового перемикача, який активується при значенні *terlev*, що відповідає спотвореній комбінації, і формує протилежний логічний рівень. Таким чином забезпечується нейтралізація небажаного впливу та коректне відображення функції для всіх вхідних комбінацій.

5. Обрані виходи комбінуються, якщо на якійсь комбінації вхідних змінних вихідне значення не дорівнює значенню шуканої функції, повертаємось до пункту 4.

Для прискорення процесу синтезу трійкових логічних функцій та зниження ймовірності помилок на етапі підбору перемикачів було розроблено програмне забезпечення мовою програмування Python. головне вікно програми зображено на рисунку 1.

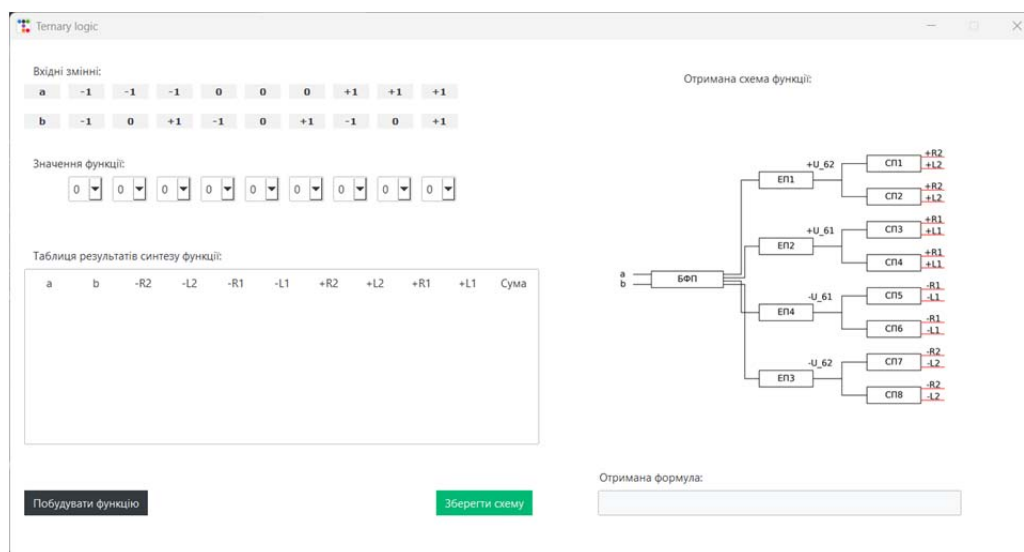


Рисунок 1 – Головне вікно програми

Джерело: розроблено авторами

Весь процес побудови функції відбувається в інтерактивному режимі та максимально спрощений для зручності користувача. На початковому етапі користувач вводить бажану функцію за допомогою інтерфейсу, де значення вибираються зі списків, що обмежують варіанти лише допустимими $(-1, 0, +1)$. Це дозволяє уникнути помилок і забезпечити коректність введених даних.

Після введення функції програма автоматично переходить до наступного етапу — синтезу. На цьому етапі реалізується аналіз заданих значень і виконується обчислення можливих комбінацій сигналів типу R та L, які у відповідному поєднанні дозволяють реалізувати бажану логіку.

Коли синтез завершено, система автоматично формує графічну схему, яка відображає, яким чином сигнали об'єднуються для реалізації функції. Також формується таблиця синтезу, в якій детально показано, які саме сигнали були використані та яким чином на них впливає кожна комбінацію вхідних змінних. Особливу увагу в таблиці приділено сумі цих сигналів, яка повинна співпадати з початково заданими значеннями функції. Це дозволяє не лише побачити кінцевий результат, але й проаналізувати проміжні етапи синтезу та переконатись у правильності виконаних обчислень.

Остаточним етапом є виведення результатів у зручній для користувача формі. У спеціальному полі відображається аналітична формула, яка описує побудовану функцію через комбінації виходів типу R та L. Крім того, користувач має можливість зберегти побудовану структурну схему, що відкриває перспективи для подальшого використання результатів як у навчальних, так і в дослідницьких цілях. Такий підхід дозволяє значно пришвидшити процес проектування логічних функцій і мінімізувати ймовірність помилок, що зазвичай виникають при ручному моделюванні.

Для перевірки коректності роботи програмного забезпечення було проведено тестування шляхом синтезу наступних функцій:

1. Кон'юнкція - виконується як операція мінімуму між двома змінними, аналогічно до двійкової операції «I». Вона визначає результат як найменший ступінь істинності вхідних аргументів.

2. «Приймати все» - формує визначений результат у випадку, якщо хоча б один із аргументів має відоме значення, і залишає результат невідомим лише при суперечності або повній відсутності інформації.

3. Консенсус - вважає результат істинним лише за умови повної узгодженості всіх вхідних значень. У разі будь-яких розбіжностей результат визначається як невідомий.

Кожна з функцій була реалізована за допомогою запропонованого інтерфейсу. Значення отриманих функцій повністю відповідають таблицям істинності. Це підтверджує правильність роботи алгоритму і логіку побудови структурних схем. Результати синтезу подані на рисунках 4–6, де зображено результат роботи програми, а саме: побудовані схеми для кожної з функцій, таблиці синтезу, а також наведено відповідні аналітичні формули, що описують їх реалізацію через комбінації R та L сигналів.

Висновки. У ході дослідження запропоновано алгоритм синтезу трійкових бінарних логічних функцій із використанням чотирьохпорогового багатозначного елемента. Такий підхід дозволяє значно спростити побудову логічних схем, зменшити кількість необхідних апаратних ресурсів і підвищити ефективність обробки даних.

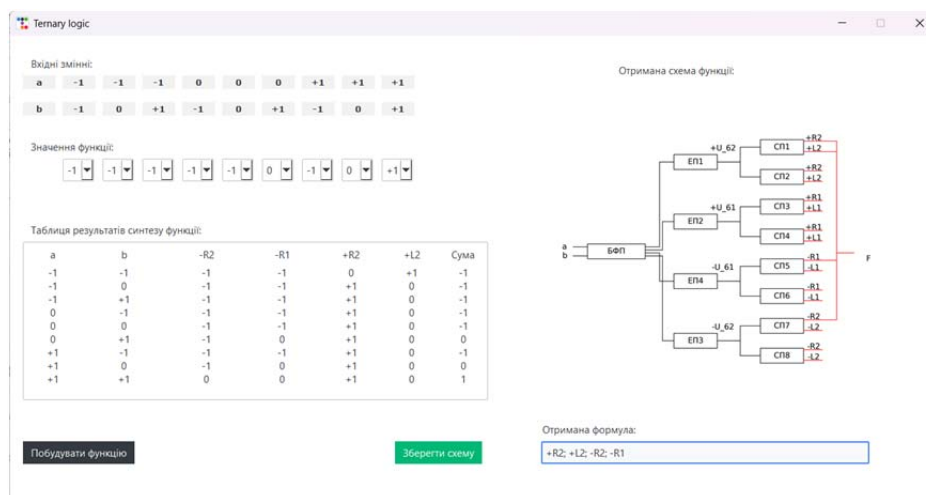


Рисунок 4 – Побудова сильної кон'юнкції

Джерело: розроблено авторами

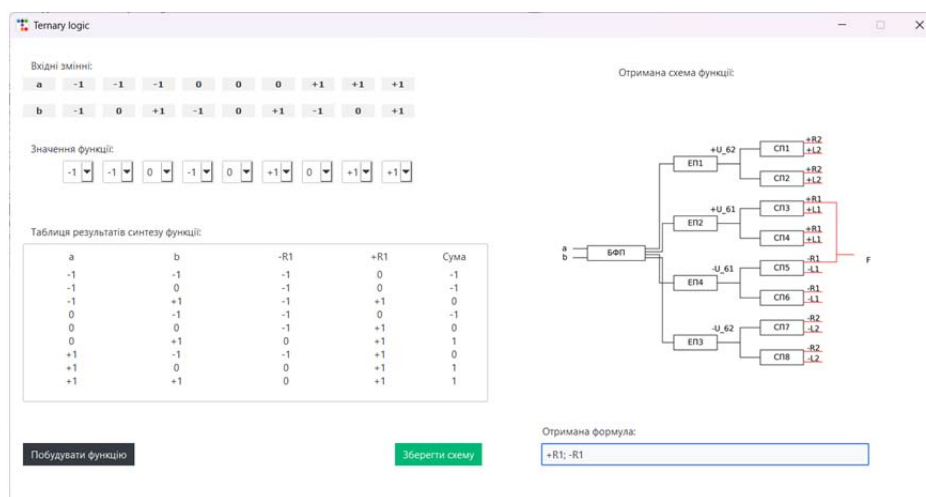


Рисунок 5 – Побудова функції «Приймати все»

Джерело: розроблено авторами

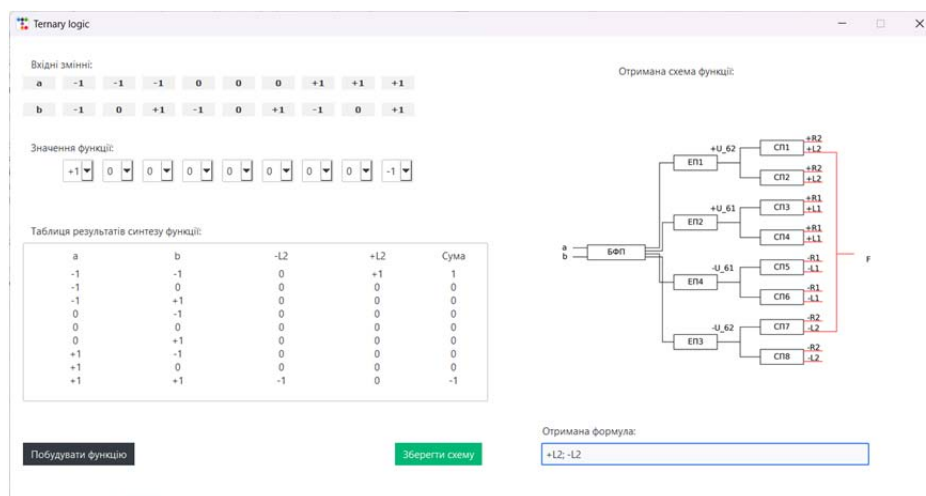


Рисунок 6 – Побудова консенсусу

Джерело: розроблено авторами

Застосування багатопорогових елементів відкриває перспективи для створення компактніших і швидкодіючих логічних систем.

Окремою перевагою є створене програмне забезпечення, яке автоматизує процес синтезу логічних функцій. Воно дозволяє користувачеві отримати як графічне зображення схеми, так і відповідну аналітичну формулу, що полегшує подальше теоретичне дослідження або практичне впровадження. Тестування програми підтвердило її функціональність і правильність реалізованих алгоритмів.

Проведений порівняльний аналіз трійкової та двійкової логіки показав, що трійкова логіка має низку важливих переваг, зокрема — потенціал до зменшення складності схем і зростання швидкодії.

Отримані результати мають як теоретичне, так і прикладне значення. Вони можуть бути використані як основа для подальших досліджень у галузі багатозначної логіки та розроблення нових обчислювальних архітектур. Запропоновані рішення сприятимуть розвитку цифрових технологій, орієнтованих на енергоефективність та підвищену швидкодію.

Список літератури

1. Gunchenko, Y., Shugailo, Y., Bercov, Y., Martynovych, L. Analysis of the current state of the elements of ternary logic. *Collection of Scientific Papers of Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv*. 2022. № 76. С. 88–101. DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481x/2022/76-08> (дата звернення: 15.04.2025).
2. Sandhie, Z. T., Ahmed, F. U., Chowdhury, M. H. Design of ternary logic and arithmetic circuits using GNRFET. *IEEE Open Journal of Nanotechnology*. 2020. Т. 1. С. 77–87. DOI: <https://doi.org/10.1109/ojnano.2020.3020567> (дата звернення: 15.04.2025).
3. Багатопороговий елемент багатозначної логіки : пат. 118735 Україна : МПК H03K19/00. № u201701717 ; заявл. 23.03.2017 ; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16.
4. Трійковий півсуматор на основі багатопорогового елемента багатозначної логіки : пат. 122996 Україна : МПК H03K19/00, G06F7/00. № u201706115 ; заявл. 16.06.2017 ; опубл. 12.02.2018, Бюл. № 3.
5. Трійковий повний однорозрядний суматор : пат. 139770 Україна : МПК H03K19/00. № u201905060 ; заявл. 13.05.2019 ; опубл. 27.01.2020, Бюл. № 2.
6. Трійковий RS-тригер : пат. 149386 Україна : МПК H03K19/00. № u202104077 ; заявл. 13.07.2021 ; опубл. 11.11.2021, Бюл. № 45.
7. Універсальний пристрій для побудови трійкових унарних операцій : пат. 130182 Україна : МПК H03K19/00. № u201806401 ; заявл. 08.06.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22.
8. Левчук, В., Гунченко, Ю., Кузнichenko, С. та ін. Концепція побудови логічних і арифметичних пристроїв для багатозначних логік. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.* (Івано-Франківськ, 14–18 трав. 2018 р.). Івано-Франківськ, 2018. С. 216–219. URL: <https://journal.comp-sc.if.ua/test/index.php/ITCM/article/view/428/220> (дата звернення: 15.04.2025).
9. Zahoor, F., Ahmad, I., Kazim, R. et al. Design implementations of ternary logic systems: A critical review. *Results in Engineering*. 2024. Article ID: 102761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102761> (дата звернення: 15.04.2025).
10. Martynovych, L., Gunchenko, Y., Shugailo, Y., Bercov, Y. Design and synthesis of ternary logic elements. *Computer Systems and Information Technologies*. 2022. № 4. С. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2022-4-8> (дата звернення: 15.04.2025).

References

1. Gunchenko, Y., Shugailo, Y., Bercov, Y., & Martynovych, L. (2022). Analysis of the current state of the elements of ternary logic. *Zbirnyk naukovykh prats' Viys'kovoho instytutu Kyivskoho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka*, (76), 88–101. <https://doi.org/10.17721/2519-481x/2022/76-08>
2. Sandhie, Z. T., Ahmed, F. U., & Chowdhury, M. H. (2020). Design of ternary logic and arithmetic circuits using GNRFET. *IEEE Open Journal of Nanotechnology*, 1, 77–87. <https://doi.org/10.1109/ojnano.2020.3020567>
3. Gunchenko, Y. O. (2017). Multiplet threshold element of multivalued logic (Ukrainian Patent No. 118735). Odesa I. I. Mechnikov National University.

4. Gunchenko, Y. O., Lenkov, S. V., Malakhov, Y. V., Shvoro, S. A., Ustymchuk, V. V., Lukin, V. Y., Mezhuiev, V. I., Lenkov, Y. S., & Levchuk, V. V. (2018). Ternary half-adder based on a multiplet threshold element of multivalued logic (Ukrainian Patent No. 122996). Odesa I. I. Mechnikov National University.
5. Gunchenko, Y. O., Lenkov, S. V., Shvoro, S. A., Mezhuiev, V. I., Levchenko, A. O., Kuznichenko, S. D., Lenkov, Y. S., Nikolaenko, O. Y., Shvoro, A. S., Berkov, Y. M., & Romanenko, K. Y. (2020). Ternary full single-bit adder (Ukrainian Patent No. 139770). Odesa I. I. Mechnikov National University.
6. Gunchenko, Y. O., Glauberman, M. A., Martynovych, L. Y., Romanenko, K. Y., Mezhuiev, V. I., Masliy, N. D., Shugailo, Y. B., Berkov, Y. M., & Fastyskovskyi, P. P. (2021). Ternary RS flip-flop (Ukrainian Patent No. 149386). Odesa I. I. Mechnikov National University.
7. Gunchenko, Y. O., Lenkov, S. V., Shvoro, S. A., Mezhuiev, V. I., Lendel, T. I., Lukin, V. Y., Zahrebniuk, V. I., Lenkov, Y. S., & Levchuk, V. V. (2018). Universal device for constructing ternary unary operations (Ukrainian Patent No. 130182). National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.
8. Levchuk, V., Gunchenko, Y., Kuznichenko, S., et al. (2018). The concept of constructing logical and arithmetic devices for multivalued logics. In *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterne modeliuвання: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Ivano-Frankivsk, May 14–18, 2018) (pp. 216–219). Ivano-Frankivsk. <https://journal.comp-sc.if.ua/test/index.php/ITCM/article/view/428/220> [in Ukrainian]
9. Zahoor, F., Ahmad, I., Kazim, R., et al. (2024). Design implementations of ternary logic systems: A critical review. *Results in Engineering*, Article ID 102761. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102761>
10. Martynovych, L., Gunchenko, Y., Shugailo, Y., & Berkov, Y. (2022). Design and synthesis of ternary logic elements. *Computer Systems and Information Technologies*, (4), 52–60. <https://doi.org/10.31891/csit-2022-4-8>

Kateryna Budat, Larysa Martynovych

Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

Software Implementation of the Synthesis of Ternary Two-Input Logic Functions

The article proposes a method for synthesizing ternary binary logic functions using a multi-threshold element, which significantly extends the capabilities of ternary logic compared to traditional binary logic. The aim of the work is to develop an algorithm for synthesizing ternary logic functions, based on the use of a multi-threshold element, which simplifies the design of logical circuits and reduces energy consumption while maintaining high data processing speed.

The study includes a comparative analysis of ternary and binary logic functions, allowing an assessment of the advantages of ternary logic, particularly its ability to process more values than binary logic, which opens up new possibilities for creating more efficient computing devices. Specifically, ternary logic can reduce the complexity of circuits and hardware resource usage, while also enhancing performance in tasks where energy efficiency is critical. An essential part of the research is the development of an algorithm for synthesizing ternary binary logic functions based on a four-threshold multi-valued element. Furthermore, a software module was implemented to automate the synthesis of ternary functions. The program not only generates a graphical representation of the logical circuit but also formulates the analytical expression corresponding to the given logical function. This significantly simplifies the design and analysis of logical systems and enhances the efficiency of computations.

Considering the high potential of ternary logic, the results of this work are significant not only for theoretical research but also for practical applications in the development of new computing devices and technologies. The further development of these ideas could contribute to the progress in computational systems working on new principles and open up new possibilities for optimizing technological processes in various fields of science and engineering.

ternary logic, multi-threshold element of multi-valued logic, threshold element of ternary logic, ternary logic element, multi-valued logic

Одержано (Received) 18.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 29.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 02.05.2025

УДК 004.4

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.52-62](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.52-62)**Б. Ю. Вінтенко**^{1,2}, **О. А. Смірнов**³, проф., д-р техн. наук,**І. В. Миронець**¹, доц., канд. техн. наук, **Т. В. Смірнова**³, канд. техн. наук,**О. В. Коваленко**³, проф., д-р техн. наук, **А. М. Мацуй**³, проф., д-р техн. наук¹Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна²ПАТ “Науково-виробниче підприємство “Радій”, м. Кропивницький, Україна³Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: boris.vintenko@gmail.com, dr.smirnova@gmail.com, i.myronets@chdtu.edu.ua,

sm.tetyana@gmail.com, dr.kovalenkoov@gmail.com, matsuyan@ukr.net

Модель шляхів отримання вхідних даних комп'ютерної інтелектуальної системи підтримки оперативного персоналу АЕС

У статті досліджуються методи підвищення відмовостійкості комп'ютерної інтелектуальної системи підтримки оператора енергоблоку АЕС. Метою даного дослідження є підвищення відмовостійкості інтелектуальних систем підтримки оператора при отриманні інформації про стан технологічних параметрів, важливих для процедур керування енергоблоком. Об'єктом дослідження є шляхи отримання вхідних даних комп'ютеризованою інтелектуальною системою підтримки оператора АЕС. Предметом дослідження є модель шляхів надходження вхідної інформації до комп'ютерної інтелектуальної системи підтримки оператора АЕС. Розглянуто задачу забезпечення надійності вхідної інформації та способи її вирішення, які ґрунтуються на резервуванні та багатоверсійності застосованих компонентів. Розроблена імітаційна модель шляхів вхідних даних комп'ютерної інтелектуальної системи підтримки оператора енергоблоку АЕС, що відрізняється від відомих врахуванням показників багатоверсійності компонентів.

система підтримки прийняття рішень, резервування, відмово стійкість, надійність, багатоверсійність, імітаційна модель

Постановка проблеми. Енергоблок АЕС є складним технологічним об'єктом, керування яким здійснюється оперативним персоналом (ОП) на блочному щиті керування (БЩК). Під час роботи ОП використовує інформацію, яка надається йому за допомогою індикаторів та приладів панелей керування, а також за допомогою цифрових інформаційних систем. Прийняття рішень ОП здійснюється на основі технологічних регламентів.

Для підвищення ефективності та надійності роботи ОП, актуальною науково-практичною задачею є створення комп'ютеризованих інтелектуальних систем підтримки оператора (СПО) [1].

Інформація про значення технологічних параметрів отримується з датчиків, що встановлені на обладнанні енергоблоку. Дані з цих датчиків електричними каналами передаються до програмно-технічних комплексів (ПТК) енергоблоку. Інформація про параметри у вигляді значень аналогових та дискретних значень реєструється на серверах ПТК та за допомогою комп'ютерних мереж передається до інших систем енергоблоку, зокрема і до СПО.

Актуальність даних про стан технологічних параметрів є необхідною умовою для функціонування СПО. Тому важливою задачею при створенні СПО є підвищення відмовостійкості СПО в частині отримання цих даних.

Метою дослідження є підвищення відмовостійкості СПО при отриманні інформації про стан технологічних параметрів, важливих для процедур керування енергоблоком.

Об'єктом дослідження є шляхи отримання вхідних даних комп'ютеризованою інтелектуальною системою підтримки оператора АЕС.

Предметом дослідження є модель шляхів надходження вхідної інформації до комп'ютерної інтелектуальної системи підтримки оператора АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Систему підтримки оператора можна розглядати як набір об'єктів, одним з яких є підсистема отримання вхідних даних.

Стійкість систем до відмов, тобто здатність виконувати основні функції при виникненні відмов окремих компонентів, може реалізовуватися різними способами.

Так, популярним методом підвищення відмовостійкості є резервування обладнання, програмного забезпечення та інформації. Також для підвищення стійкості до відмов програмного забезпечення та інформації є застосування самоконтролю та блоків відновлення [2]. При використанні даної технології результати обчислень перед передачею в іншу підсистему перевіряються на коректність, і у випадку непроходження перевірки ті ж самі обчислення виконуються повторно, іншими способами, до досягнення потрібного результату.

В галузях, що вимагають високої надійності та стійкості до відмов, останніми десятиліттями набуває популярності використання багатoversійних технологій [4]. Так, для підвищення відмовостійкості апаратного забезпечення використовуються різні типи мікросхем (мікропроцесори та FPGA) [5], для підвищення відмовостійкості програмного забезпечення використовується N-версійне програмування [6], [7].

Відмови з загальної причини є проблемою для резервованих систем [8]. У випадку виникнення загальної причини можуть відмовити одразу декілька компонентів. Такою причиною може бути як апаратна (наприклад, зникнення електричного живлення основного та резервованого сервера), так і недолік у проєктуванні (розміщення резервованих ліній зв'язку в одній кабельній шахті та вихід з ладу обох при пожежі), а також дефект програмного забезпечення, що використовується у резервованих каналах.

Для зменшення імовірності відмови з загальної причини використовується багатoversійне програмне забезпечення. Багатoversійність може бути застосована для даних, програмного коду, та функціональності [9]. Після виконання функції різними версіями програмного забезпечення відбувається аналіз отриманих результатів, порівняння їх між собою та фільтрування результатів, що не відповідають вимогам. В Також використовуються різні схеми голосування. Найпоширенішими схемами є «1/2», «2/3», «2/4» або «3/4». Вибір схеми залежить від вимог до безпеки, надійності, допустимого рівня хибних спрацювань та неспрацювань. В рамках вирішення даного завдання у попередніх роботах авторів розглянуті питання дослідження нормативних документів та галузевих стандартів розробки програмного забезпечення комп'ютерних систем управління АЕС, важливих для безпеки й дослідження вимог міжнародних стандартів IEC60880 та IEC62138 з розробки програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем АЕС, важливих для безпеки [11], [12] та дослідження вимог та аналіз кібербезпеки програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем АЕС, важливих для безпеки та дослідження інформаційного забезпечення та технологічних регламентів процесів керування критичною інфраструктурою енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 [13], [14].

Таким чином, підвищення відмовостійкості підсистеми отримання вхідних даних СПО доцільно проводити на основі аналізу відмовостійкості джерел отримання цих даних та шляхів їх передачі.

Постановка завдання. У даному дослідженні необхідно створити модель шляхів вхідних даних системи підтримки оператора, в якій буде міститися інформація про використані технології та їх версійні відмінності.

Виклад основного матеріалу. Методи забезпечення відмовостійкості СПО. Джерела вхідних даних для СПО. Основною функцією підсистеми отримання вхідних даних СПО є прийом значень технологічних параметрів від зовнішнього оточення. Точками взаємодії підсистеми з зовнішнім оточенням є вхідні сигнали. Вхідні сигнали можуть бути розділені на первинні та вторинні.

Значення первинних вхідних сигналів отримуються шляхом вимірювань. Прикладами таких значень є тиск, температура, тощо. Також, до первинних вхідних сигналів можна віднести інформацію, яка отримана від оператора: введені через інтерфейс користувача значення, натиснуті оператором кнопки, сформовані команди за допомогою ключів керування тощо.

Вторинними сигналами можна вважати сигнали, значення яких отримані в результаті обробки даних первинних сигналів: швидкість, температура насичення, спрацювання уставок, тощо.

У найпростішому випадку, вхідна інформація СПО може бути представлена у вигляді множини технологічних параметрів P :

$$P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\} \quad (1)$$

де P_i – окремий вхідний параметр, n – загальна кількість параметрів. Проте таку модель не можна використовувати безпосередньо. На практиці, між параметром та алгоритмом СПО існує система вимірювання з проміжних апаратних та програмних елементів, які забезпечують прийняття, первинну обробку, перетворення, передачу інформації. Це обумовлено такими причинами:

- необхідність фільтрації та обробки даних у випадку наявності шумів, перешкод або нестабільності;
- наявність параметрів, що формуються на основі сигналів з декількох датчиків або обчислень;
- конверсія сигналів з одного типу в інший, стандартний та придатний для обробки;
- фізична віддаленість елементів не дозволяє підключити датчики безпосередньо до системи;
- наявність фізичних бар'єрів захисту;
- необхідність захисту даних від зовнішніх атак: додаткові елементи (брандмауери, системи контролю доступу, дата-діоди), що забезпечують інформаційну безпеку;
- необхідність протоколювання та моніторингу;
- координація та інтеграція великої кількості ПТК, реалізація різних протоколів зв'язку за допомогою шлюзів, тощо.

Елементи шляхів. Враховуючи наявність системи вимірювання та обробки, для кожного параметру можна визначити шляхи передачі, що складаються з множини елементів. Для представлення шляху $Path$ використаємо векторну модель:

$$Path = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_i\} \quad (2)$$

де E_{ni} – елемент, через який проходять дані сигналу.

Елементи шляху передачі параметру приведені на рисунку 1.

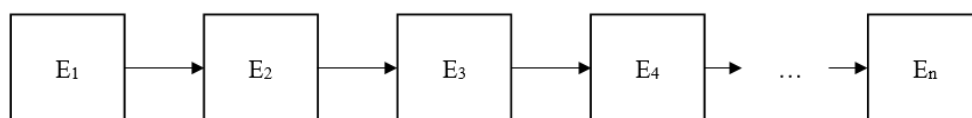


Рисунок 1 – Елементи шляху вхідних даних

Джерело: розроблено авторами

Кожний елемент у векторі *Path* може мати набір атрибутів: тип, продуктивність, надійність, протокол обміну, час затримки, тощо.

Приклад набору елементів шляху вхідних даних для параметру:

- E_1 – датчик;
- E_2 – перетворювач форми сигналу (аналоговий-цифровий);
- E_3 – фільтр;
- E_4 – кабельний канал;
- E_5 – комутатор;
- E_6 – модуль контролю безпеки;
- E_7 – мережева карта;
- E_8 – сервер;
- E_9 – програмне забезпечення сервера.

Така модель отримання вхідних даних СПО, з точки зору теорії надійності, є найменш стійкою до відмов, оскільки передбачає послідовне з'єднання елементів.

Резервування шляхів передачі вхідних сигналів. Одним з поширених способів підвищення відмовостійкості систем вимірювання та передачі критичних параметрів є резервування. Зазвичай для вимірювання значення одного технологічного параметру застосовуються декілька датчиків, які мають незалежну схему живлення, конструкцію та канали передачі інформації (багатоверсійний підхід). При відмові елементів одного каналу отримання даних інформація про параметр залишається актуальною через інші датчики та канали зв'язку.

На АЕС можуть бути використані наступні види резервування:

- резервування датчиків;
- резервування ліній зв'язку;
- резервування програмного забезпечення;
- резервування комунікаційних пристроїв;
- резервування серверів тощо.

Таким чином, для отримання значення одного параметра може використовуватися матриця шляхів

$$\begin{Bmatrix} Path_1 \\ Path_2 \\ \vdots \\ Path_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1m} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \dots & E_{nm} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де E_{ij} – елементи шляхів.

При резервуванні отримується паралельна робота шляхів вимірювання (або їх частин), що підвищує відмовостійкість системи.

Слід зазначити, що створення окремих шляхів отримання вхідної інформації для кожного ПТК є складною та не завжди можливою задачею. Зазвичай інформація про критично важливі параметри отримується з резервованих датчиків, розмножується та передається у різні ПТК. В свою чергу, підсистема отримання вхідних даних СПО може отримати значення одного і того самого параметру від різних ПТК. Наприклад, інформація про температуру теплоносія в реакторі реєструється в системах захисту (АЗ), системах безпеки (СБ), системах нормальної експлуатації (СНЕ). Кожна точка реєстрації параметру в ПТК є окремим сигналом з унікальним ідентифікатором. Таким чином, СПО може отримати інформацію про значення технологічного параметру з різних сигналів, що надходять різними шляхами, з залученням різних елементів.

Багатоверсійність елементів шляхів. Кожний елемент вносить певну інтенсивність відмов у систему. Всі відмови можуть бути розподілені на дві категорії: відмови з фізичних причин та відмови через недоліки у проектуванні.

Для оцінки інтенсивності відмов через фізичні дефекти використовуються довідкові дані виробників. Інтенсивність відмов через дефекти проектування може бути оцінена статистичним шляхом.

Метод кількісної оцінки зменшення інтенсивності відмов при використанні двOVERсійної (диверсійної) системи описаний у [10].

У відповідності до даного методу, множина всіх відмов N у двOVERсійній системі визначається як

$$N = N_1 \cup N_2 \cup N_{12}, \quad (4)$$

де N_1 – множина відмов тільки першої версії системи, N_2 – множина відмов тільки другої версії системи, N_{12} – множина одночасних відмов першої та другої версії системи (рисунок 2).

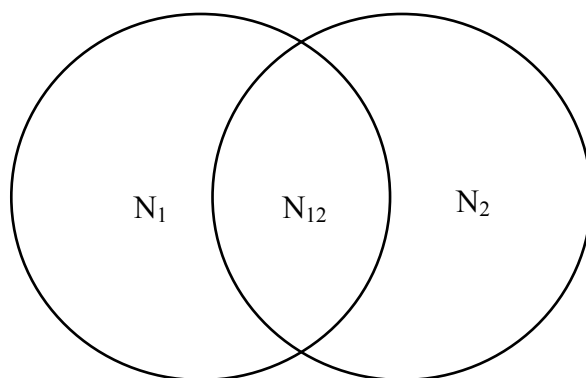


Рисунок 2 – Множини відмов двOVERсійної системи

Джерело: розроблено авторами

Інтенсивність відмов двOVERсійної системи визначає потужність множини N_{12} . Очевидно, що ця множина зменшується зі зростанням відмінностей у проектуванні двOVERсійної системи.

Кількісне співвідношення інтенсивності відмов двOVERсійної системи та одноOVERсійної системи визначається коефіцієнтом диверсності:

$$K_D = \frac{|N_{12}|}{|N^{1B}|} \quad (5)$$

де $|N_{12}|$ – потужність множини відмов двOVERсійної системи, а $|N^{1B}|$ – потужність множини відмов одноOVERсійної системи.

В результаті застосування диверсності, інтенсивність відмов двOVERсійної системи λ_{12} , що викликані загальними дефектами проектування обох версій становить:

$$\lambda_{12} = K_D \cdot \lambda^{1B} \quad (6)$$

де λ_{12} – інтенсивність відмов одноOVERсійної системи, K_D – коефіцієнт диверсності.

Для кількісної оцінки глибини різниці між версіями елементів системи використовуються метрики диверсності. Значення 0 метрики відповідає відсутності різниці між версіями (одноOVERсійна система), 4 – максимальній різниці.

Коефіцієнт диверсності K_D системи обернено пропорційний до інтегрального показника диверсності системи: при відсутності диверсності ($D = 0$) коефіцієнт K_D буде рівний одиниці, що згідно (6), не знизить інтенсивність відмов з загальної причини.

Розробка моделі шляхів отримання вхідних даних СПО. Відмінність елементів шляхів вхідних даних. Для забезпечення відмовостійкої роботи СПО має використовувати резервовані дані у вигляді сигналів. Як було показано, ці дані можуть надходити різними шляхами через різні послідовності елементів. Відповідно, задачею

розробника СПО є вибір сигналів та шляхів їх прийому з урахуванням обраної схеми голосування.

У шляхах передачі інформації, які можуть забезпечувати СПО вхідними даними, можуть застосовуватися різні типи елементів. До кожного з виду елементів може бути застосована шкала відмінностей між їх версіями.

Таким чином, для аналізу відмовостійкості шляхів вхідних даних СПО необхідно сформувати наступні дані:

- для кожного типу елемента на основі статистичних даних має бути визначена базова кількість відмов, що сформує показник N^{16} ;
- на основі відмінностей для кожного набору шляхів вхідних даних має бути сформований набір показників глибини диверсності, які сформують загальний показник диверсності D .

Розробка моделі шляхів вхідних даних

До складу кожного ПТК входять модулі прийому інформації, логічні модулі, сервери та програмне забезпечення. Кожний ПТК цифровим каналом передає необхідну інформацію до суміжних систем. Інформацію про один і той самий технологічний параметр СПО може запитувати у різних серверів різних ПТК.

Узагальнена архітектура отримання даних може бути представлена у вигляді мережі. Приклад такої мережі приведений на рисунку 3.

На даній схемі використовуються такі вузли: датчики (S), перетворювачі (C), кабелі, модулі вхідних сигналів (In), логічні модулі та модулі передачі інформації (Lm), комутатори (Comm), сервери (Srv), комп'ютери (Pc) з мережевими картами та програмним забезпеченням.

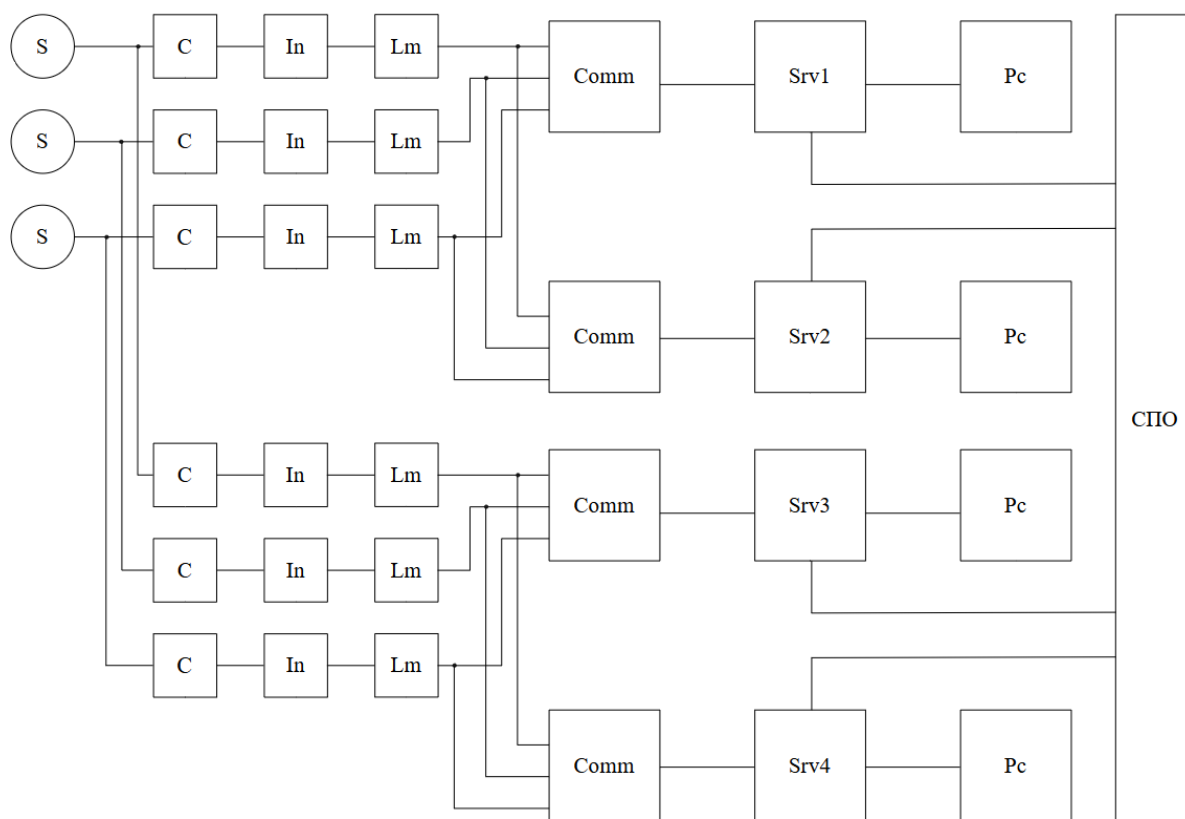


Рисунок 3 – Архітектура мережі прийому вхідних даних

Джерело: розроблено авторами

Дана мережа може бути представлена у вигляді графу $G = (E, L)$, вершини E якого – елементи каналів зв'язку, а ребра L – канали передачі інформації.

Основні властивості даного графу будуть наступними:

- граф є деревом;
- граф має одну початкову точку, яка визначає собою вимірюваний технологічний параметр;
- граф має одну кінцеву точку, яка є входом до системи, вхідні дані якої аналізуються;
- граф є орієнтованим, оскільки сигнали від джерел до системи передаються в одному напрямку;
- від початку вимірювання до точки прийому інформації є як мінімум один шлях;
- для первинних параметрів шлях сигналу починається з пристрою, який реєструє сигнал (датчика);
- для вторинних параметрів шлях сигналу починається з логічного модуля ПТК, який обчислює значення даного параметру. Наприклад, якщо вхідними даними є значення температури насичення, то до складу шляху включаються також датчики температури та тиску, а також компоненти, які виконують обчислення даного сигналу.

Приклад графу шляхів вхідних даних приведений на рисунку 4. Рамками окреслені окремі підсистеми.

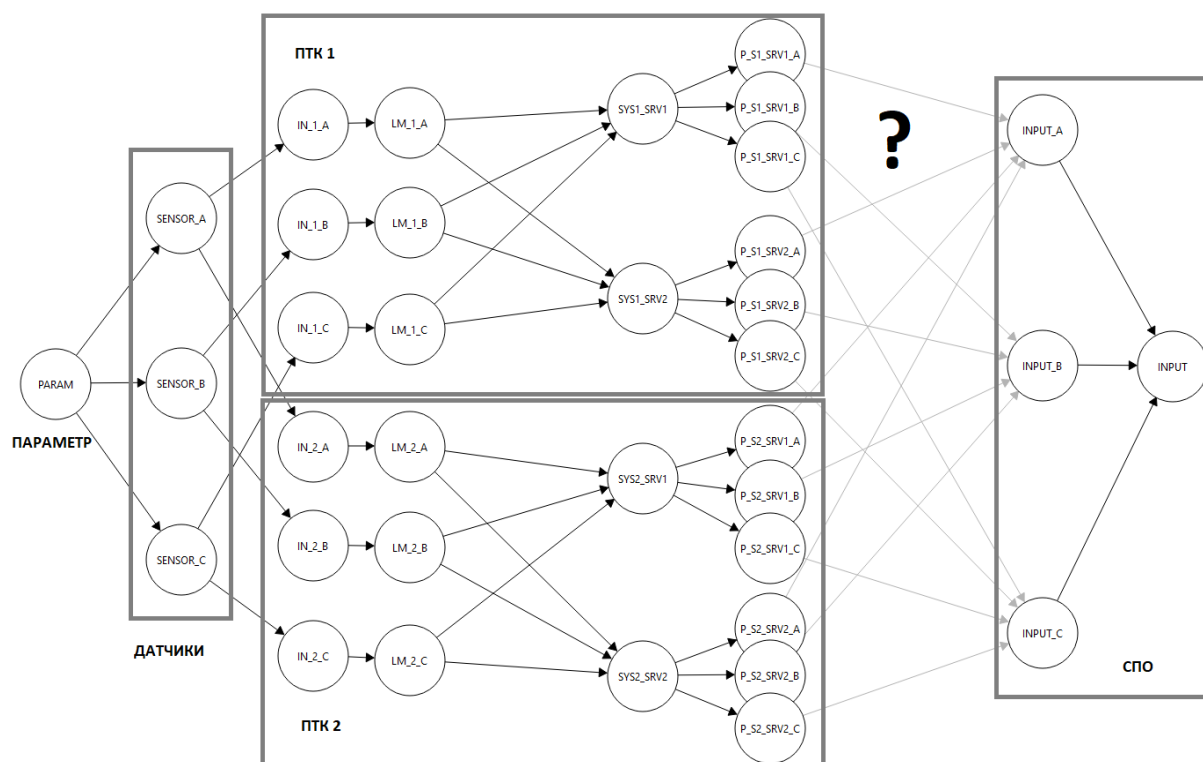


Рисунок 4 – Граф шляхів вхідних даних

Джерело: розроблено авторами

Кожна вершина графу $e \in E$ описується набором наступних властивостей:

$$e = \{Type, \{Tech\}, \{Versions\}, Tag\}. \quad (7)$$

Ці властивості мають наступні значення:

- **тип елементу** Type – код типу елементу, що є складовим шляху передачі. На шляху передачі використовуються різні типи елементів, такі як датчики, кабелі,

комутатори, сервери, програмне забезпечення. Кожний тип характеризується власним набором параметрів, за яким його можна порівнювати з іншими елементами. В таких задачах, як визначення відмовостійкості шляху, порівняння доцільно виконувати між компонентами, які мають один тип;

– **коди технологій** $\{Tech\}$ – номери технологій, що використовуються у даному елементі. Використовуються для визначення можливості відмови з загальної причини для обраних елементів;

– **версії технологій** $\{Versions\}$ – версії технологій, що використовуються у даному елементі. Використовуються для визначення глибини версійної відмінності між шляхами;

– **тег** Tag – означає додаткову інформацію, зокрема початок та кінець шляху (“param” та “source”).

Крім графу мережі, до складу моделі входить інформація про технології, що використовуються в елементах. Кожна технологія $tech \in Tech$ описується часом напрацювання на відмову, переліком версій та версійною відмінністю (глибиною диверсності):

$$tech = \{MTTF, \{Version, D\}\}. \quad (8)$$

Ці властивості мають наступні значення:

– **час напрацювання на відмову** MTTF – прогнозований час напрацювання на відмову, що є наслідком застосування даної технології. Ця величина визначається за статистичною інформацією або за документацією виробника елемента. З цього показника отримується **інтенсивність відмов елемента** λ :

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}, \quad (9)$$

– **масив пар значень версії та диверсності** $\{Version, D\}$ характеризує наявні версії даної технології та їх версійні відмінності. В цьому масиві присутня мінімум одна базова версія 0 з показником диверсності $D = 0$, для якої визначений базовий час напрацювання на відмову. Для інших версій значення D представлене цілими значеннями від 1 до 4, яке характеризує версійну відмінність у порівнянні з базовою.

В якості версійної відмінності між парою версій технології застосовується максимальне значення показника D для заданої пари версій:

$$D(v1, v2) = \max(D(v1), D(v2)). \quad (10)$$

В залежності від виду елемента, число D формується у відповідності до методології, описаної вище.

Приклади відомостей про технології та їх базовий час напрацювання на відмову приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Приклади відомостей про технології та їх базовий час напрацювання на відмову

Найменування технології	Код	Час напрацювання на відмову
Мова програмування	1	1020
...	...	...
Мережевий протокол	3	920
...	N	

Джерело: розроблено авторами

Приклад версійної відмінності між різними версіями технології (мова програмування високого рівня) приведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Приклад версійної відмінності між різними версіями технології (мова програмування високого рівня)

Version	0 (C++11)	1 (C++14)	2 (C++20)	C#	Python
D	0	1	1	2	4

Джерело: розроблено авторами

Версійна віддаленість може бути представлена у вигляді геометричної форми. Якщо позначити кожен окрему версію точками, то відстань між точками є пропорційною до версійної віддаленості відповідно до (2.4).

Наприклад, для трьох версій, одна з яких базова ($D = 0$), друга – відрізняється незначно ($D = 1$), а третя – радикально ($D = 4$), геометрична форма відображається як трикутник, приведений на рисунку 5.

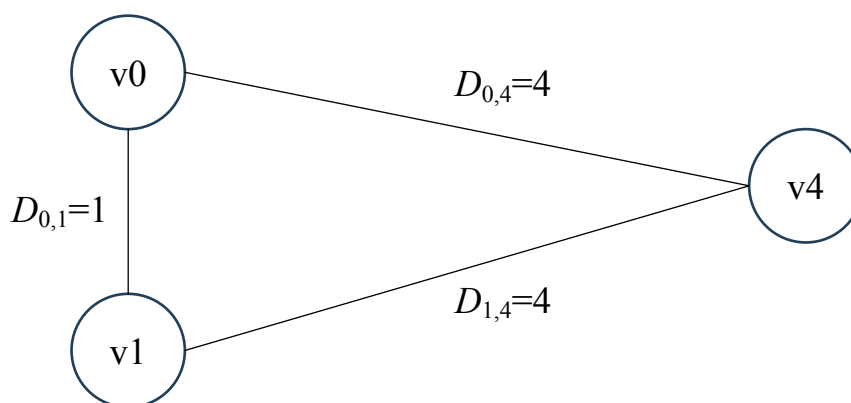


Рисунок 5 – Версійна відмінність у графічній формі

Джерело: розроблено авторами

Висновки. У даному дослідженні було показано, що при забезпеченні відмовостійкості системи підтримки оператора АЕС необхідно використовувати такі підходи як резервування, голосування та багатоверсійність.

Було показано, що вхідні дані до системи підтримки можуть надходити різними шляхами, що складаються з множини елементів.

Створено модель вхідних шляхів у вигляді графу, вершини якого визначають елементи шляхів, а ребра – напрямки передачі інформації. Дана модель включає в себе інформацію про базову інтенсивність відмов технологій елементів та їх версійну відмінність.

У подальших дослідженнях буде розглянутий аналіз відмовостійкості шляхів вхідних даних та розроблений метод вибору комбінації шляхів для максимізації відмовостійкості та мінімізації відмов в загальній причини в системі підтримки оператора АЕС.

Список літератури

1. Вінтенко Б., Миронець І., Смірнов О., Коваленко А., Коноплицька-Слободенюк О., Смірнова Т., Константинова Л. Дослідження застосування систем підтримки оперативного персоналу об'єкту критичної інфраструктури при керуванні енергоблоком АЕС з реактором типу ВВЕР-1000. *Кибербезпека: освіта, наука, техніка*. 2024. № 2(26). С. 6–26. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.673> (дата звернення: 11.04.2025).
2. Shooman M. *Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design*. JOHN WILEY & SONS, INC., 2002. URL: http://dx.doi.org/10.1002/047122460X.fmatter_indsb (дата звернення: 11.04.2025).

3. Kumar V., Singh L., Tripathi A. K. Reliability analysis of safety-critical and control systems: a state-of-the-art review. *IET Software*. 2018. Vol. 12. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-sen.2017.0053> (дата звернення: 11.04.2025).
4. Харченко В. С. Гарантоздатні системи та багатоверсійні обчислення: аспекти еволюції. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2009. № 7. С. 46–59. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2009_7_9 (дата звернення: 11.04.2025).
5. Kharchenko V. S., Bakhmach E. S., Siora A. A., Sklyar V. V., Tokarev V. I. Diversity-Oriented FPGA-Based NPP I&C Systems: Safety Assessment, Development, Implementation. *Proc. of the 18th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE18)*. Xi'an, China. 2010. Vol. 1. P. 755–764. URL: <https://doi.org/10.1115/ICONE18-29754> (дата звернення: 11.04.2025).
6. Lyu M., Jia-hongchen, Avizienis A. Experience in Metrics and Measurements for N-Version Programming. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*. 1994. Vol. 1, № 1. P. 41–62. URL: <https://doi.org/10.1142/S0218539394000052> (дата звернення: 11.04.2025).
7. Avizienis A. The Methodology of N-Version Programming. 1995.
8. Jones H. Common Cause Failures and Ultra Reliability. *42nd International Conference on Environmental Systems*. AIAA 2012-3602. 2012.
9. Strigini L., Littlewood B. A discussion of practices for enhancing diversity in software designs. London: Centre for Software Reliability, City University London, 2000. URL: <https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/275/> (дата звернення: 11.04.2025).
10. Бахмач Є. С., Герасименко О. Д., Головір В. А., Сіора О. А., Скляр В. В., Токарев В. І., Харченко В. С. Стійкі до відмов інформаційно-керуючі системи на програмованій логіці. Харків–Кіровоград : НАУ «ХАІ», НВП «Радій», 2008.
11. Вінтенко Б. Ю., Смірнов О. А., Коваленко О. В., Смірнов С. А., Коваленко А. С. Дослідження нормативних документів та галузевих стандартів розробки програмного забезпечення комп'ютерних систем управління АЕС, важливих для безпеки. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. Вип. 2(72). С. 170–178. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.170> (дата звернення: 11.04.2025).
12. Вінтенко Б. Ю., Смірнов О. А., Коваленко А. С., Смірнов С. А., Буравченко К. О. Дослідження вимог міжнародних стандартів IEC60880 та IEC62138 з розробки програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем АЕС, важливих для безпеки. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. Вип. 3(73). С. 155–166. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.155> (дата звернення: 11.04.2025).
13. Вінтенко Б., Миронець І., Смірнов О., Кравчук О., Козірова Н., Савеленко Г., Коваленко А. Дослідження вимог та аналіз кібербезпеки програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем АЕС, важливих для безпеки. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2024. № 3(23). С. 111–131. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.23.111131> (дата звернення: 11.04.2025).
14. Вінтенко Б. Ю., Миронець І. В., Смірнов О. А., Коваленко О. В., Смірнов С. А., Буравченко К. О., Якименко Н. М. Дослідження інформаційного забезпечення та технологічних регламентів процесів керування критичною інфраструктурою енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2024. № 1(25). С. 253–278. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.253278> (дата звернення: 11.04.2025).

References

1. Vintenko, B., Myronets, I., Smirnov, O., Kovalenko, A., Konoplytska-Slobodeniuk, O., Smirnova, T., Konstantinova, L. (2024) "Study of the application of support systems for operational personnel of a critical infrastructure facility when managing a nuclear power plant unit with a VVER-1000 reactor". Electronic professional scientific publication "Cybersecurity: education, science, technology", No. 2(26), pp. 6-26. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.673> [in Ukrainian].
2. Shooman M. (2002). Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design. JOHN WILEY & SONS, INC. URL: http://dx.doi.org/10.1002/047122460X.fmatter_indsub
3. Kumar, V., Singh, L. and Tripathi, A.K. (2018), Reliability analysis of safety-critical and control systems: a state-of-the-art review. *IET Softw.*, 12: 1-18. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-sen.2017.0053>
4. Kharchenko V. S. (2009) Warranty-ready systems and multi-version computing: aspects of evolution / V. S. Kharchenko // *Radioelectronic and computer systems*. No. 7. P.46-59. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2009_7_9 [in Ukrainian].
5. Kharchenko, VS, Bakhmach, ES, Siora, AA, Sklyar, VV, & Tokarev, VI. (2010) "Diversity-Oriented FPGA-Based NPP I&C Systems: Safety Assessment, Development, Implementation." *Proceedings of the 18th International Conference on Nuclear Engineering. 18th International Conference on Nuclear Engineering: Volume 1*. Xi'an, China. May 17–21, pp. 755-764. ASME. URL: <https://doi.org/10.1115/ICONE18-29754>

6. Lyu, Michael & Jia-hongchen, & Algirdasavi Žienis,. (1994). Experience in Metrics and Measurements for N-Version Programming. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. Vol| 01. No 01. pp. 41-62. URL: <https://doi.org/10.1142/S0218539394000052>
7. Avizienis, Algirdas. (1995). The Methodology of N-Version Programming.
8. Harry Jones. (2012) "Common Cause Failures and Ultra Reliability," AIAA 2012-3602. *42nd International Conference on Environmental Systems*.
9. Strigini, L. & Littlewood, B. (2000). A discussion of practices for enhancing diversity in software designs. London, UK: Centre for Software Reliability, City University London. URL: <https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/275/>
10. Bakhmach E. S., Gerasimenko O. D., Golovir V. A., Siora O. A., Sklyar V. V., Tokarev V. I., Kharchenko V. S. (2008) "Fault-Resistant Information and Control Systems Based on Programmable Logic." NAU "Khayar", Scientific Research Enterprise "Radius", Kharkiv-Kirovograd.
11. Vintenko B.Yu., Smirnov O.A., Kovalenko O.V., Smirnov S.A., Kovalenko A.S. (2023) "Study of regulatory documents and industry standards for the development of software for computer control systems of nuclear power plants important for safety". Control, navigation and communication systems, issue 2(72), pp. 170-178. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.170> [in Ukrainian]
12. Vintenko B.Yu., Smirnov O.A., Kovalenko A.S., Smirnov S.A., Buravchenko K.O. (2023) "Study of the requirements of international standards IEC60880 and IEC62138 for the development of software for information and control systems of nuclear power plants important for safety". Control, navigation and communication systems, issue 3(73), pp. 155-166. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.155> [in Ukrainian].
13. Vintenko, B., Myronets, I., Smirnov, O., Kravchuk, O., Kozirova, N., Savelenko, G., Kovalenko, A. (2024) "Research on requirements and analysis of cybersecurity of software of information and control systems of nuclear power plants important for safety". Cybersecurity: education, science, technology. No. 3(23), pp. 111-131. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.23.111131> [in Ukrainian].
14. Vintenko B.Yu., Myronets I.V., Smirnov O.A. Kovalenko O.V., Smirnov S.A., Buravchenko K.O., Yakymenko N.M. (2024) "Study of information support and technological regulations of critical infrastructure control processes of a nuclear power plant with a VVER-1000 reactor". Electronic professional scientific publication "Cybersecurity: education, science, technology". No. 1(25), pp. 253–278. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.253278> [in Ukrainian].

Borys Vintenko^{1,2}, **Oleksii Smirnov**³, Prof., Dr. tech. sci., **Iryna Myronets**¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetiana Smirnova**³, PhD tech. sci., **Oleksandr Kovalenko**³, Prof., Dr. tech. sci., **Anatolii Matsui**³, Prof., Dr. tech. sci.

¹*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

²*PJSC "Scientific and Production Enterprise "Radius", Kropyvnytskyi, Ukraine*

³*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

Model of Ways to Obtain Input Data for a Computer Intelligent System to Support Operational Personnel of a Nuclear Power Plant

This article investigates methods for increasing the fault tolerance of a computer intelligent support system for a nuclear power plant operator. The purpose of this study is to increase the fault tolerance of intelligent support systems for the operator when receiving information about the state of technological parameters important for the power plant control procedures. The object of the study is the ways of receiving input data by a computer intelligent support system for a nuclear power plant operator. The subject of the study is a model of the ways of receiving input information to a computer intelligent support system for a nuclear power plant operator. The problem of ensuring the reliability of input information and methods for solving it, which are based on the redundancy and multi-version of the components used, is considered. A simulation model of the input data paths of a computer intelligent support system for a nuclear power plant operator has been developed, which differs from the known ones by taking into account the indicators of multi-version of components.

decision support system, redundancy, fault tolerance, reliability, multi-versioning, simulation model

Одержано (Received) 11.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 02.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025

УДК 004.75:004.49

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.63-69](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.63-69)

О. Б. Гуральник, О. С. Савенко, проф., д-р техн. наук
Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна
e-mail: guruaalexua@gmail.com, savenko_oleg_st@ukr.net

Оброблення критичної інформації в корпоративних мережах на основі комбінованого підходу DLP системи з системою виявлення ботнетів

У статті досліджено сучасні методи та засоби оброблення критичної інформації в корпоративних мережах. Розглянуто технології Data Loss Prevention (DLP) як ключовий механізм захисту даних, особливості використання ботнетів для викрадення критично важливої інформації в корпоративних мережах. Запропоновано комбінований підхід, що інтегрує систему DLP з системою виявлення ботнет трафіку. Розроблено гібридну архітектуру моніторингу - виявлення - реагування - захист та реалізовано прототип, який блокує ексфільтрацію критичних даних, знижуючи хибно позитивні спрацювання до 2 %. Експериментальні результати підтверджують ефективність моделі та вказують на необхідність комплексного підходу до інформаційної безпеки.

ботнет, DLP, ексфільтрація даних, критична інформація, корпоративні мережі

Постановка проблеми. Сьогодні робота підприємств нерозривно пов'язана з інформаційними технологіями, а отже, обсяги даних, що циркулюють і зберігаються в корпоративних мережах, стрімко зростають. Це дає бізнесу ширші можливості для аналітики, оптимізації процесів та ухвалення управлінських рішень на основі достовірної інформації. Водночас збільшення масиву даних суттєво підвищує ризик їхнього витоку, який може завдати компанії серйозної шкоди.

Критичні відомості здатні зникнути як через необережність співробітників, так і внаслідок умисних дій зловмисників. Наслідком стає розкриття конфіденційної інформації, утрата інтелектуальної власності чи фінансових даних, що призводить до прямих фінансових втрат, підриву довіри клієнтів і партнерів та потенційних юридичних санкцій.

Упродовж останніх років в корпоративних мережах відбувається зміна характеру витоків даних. На заміну класичним каналам ексфільтрації (електронна пошта, хмарні сховища, знімні носії) дедалі частіше відбувається зараження вузлів мережі ботнет орієнтованим шкідливим програмним забезпеченням (ШПЗ). В 2024 році за допомогою цієї категорії ШПЗ було інфіковано 23 млн хостів і викрадено 2,1 млрд облікових даних, причому 70 % заражень припали на корпоративні системи [1].

Зростає, також, швидкість операцій з викрадення даних. У 45 % інцидентів дані виводяться менш ніж за добу після первинної компрометації, а медіанне вікно між зломом і ексфільтрацією скоротилося до двох діб [2].

Ботнети еволюціонують у багатофункціональні платформи. Дослідження [3] показало, що у 2024 році найбільший активний ботнет налічував 227 000 пристроїв, а спектр його застосування включав не лише DDoS, а й масштабні кампанії з викрадення конфіденційних файлів та облікових даних. У результаті традиційні DLP системи, сконцентровані на контролі вихідного трафіку, виявляються неефективними проти фрагментарного й шифрованого витоку, що відбувається всередині ботнет каналу керування й обміну.

Таким чином, наукова й прикладна проблема полягає у створенні комбінованого підходу, що інтегрує механізми DLP з високоточним виявленням ботнет активності на рівні мережевої поведінки й телеметрії кінцевих точок. Розв'язання цього завдання критично важливе для захисту критичної інформації підприємств від стрімкого, малопомітного витoku. Скорочення часу реакції SOC-підрозділів до рівня, коли ексфільтрація ще не завершена. Підвищення стійкості корпоративних мереж до складних комбінованих атак, у яких ботнет є початковим або проміжним елементом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [4] запропонували багатокласову AI-систему виявлення ботнетів у зашифрованому трафіку, яка поєднує гібридну модель KNN + Random Forest із методами Explainable AI (SHAP, LIME). Завдяки глибокому препроцесингу (PCA, SMOTE) й оптимізації гіперпараметрів автори досягли точності 0,99 на наборі CICIDS-2017 та понад 99 % у сценаріях стекингу на STU-NCC. Робота демонструє, що перехід від бінарної до багатокласової класифікації істотно підвищує детекції ботнету, а інтеграція XAI робить рішення інтерпретованим для аналітиків SOC, знижуючи хибні спрацювання.

В [5] дослідили виявлення ботнет атаки в IoT середовищі, запропонували гібридну процедуру відбору ознак, яка генерує оптимальні підмножини ознак для класифікації трафіку. Автори порівняли п'ять моделей (DT, RF, KNN, AdaBoost, Bagging) і засвідчили, що при бінарній класифікації AdaBoost досягає 99,28 % точності з 18 ознаками, тоді як у мультикласовому сценарії RF демонструє 86,62 % точності з 22 ознаками. Використання запропонованого гібридного відбору ознак підвищило показники всіх моделей у середньому на 3 %, а найкраще рішення (RF) забезпечило 95,11 % (binary) та 83,96 % (multi-class) виявлення ботнетів. Робота підтверджує ефективність комбінованого аналізу ознак і ансамблевих моделей для IoT.

Дослідження [6] зосередилося на мережевій протидії мобільним ботнетам і представили MONDEO-Tactics5G - багатоступеневий алгоритм, який працює прямо у 5G-інфраструктурі оператора й не потребує ПЗ на кінцевих пристроях. Механізм корелює сигнали DNS-тунелювання, DoH-трафіку та C2-beaconing, забезпечуючи високу точність виявлення шкідника FluBot й адаптивне управління зараженими абонентами. Трафік інфікованого гаджета обмежують так, щоб знизити ризик DDoS атаки, але не розривати активні сеанси та не погіршувати користувацький досвід. Дослідження демонструє, що мережеві контролі на рівні оператора можуть ефективно стримувати мобільні ботнети без участі користувача.

У статті [7] представлено підхід до виявлення ботнету для розподілених систем. Він базується на розробленій трирівневій моделі, яка включає компоненти ботнету: центр управління, центри управління, основні елементи ботнету (боти). Нова структура дає змогу виявляти відомі та невідомі ботнети та складається з рівнів хоста та мережі.

У роботі [8] запропоновано новий метод виявлення DDoS ботнетів на основі аналізу мережевих характеристик ботнетів. Він використовує напівконтрольоване (semi-supervised) нечітке кластерування fuzzy c-means. Аналіз здійснюється на основі характеристик, вилучених із мережевого трафіку, які можуть вказувати на наявність DDoS ботнетів у мережі.

Автори [9] запропонували нову двошарову систему виявлення зашифрованого шкідливого трафіку без дешифрування, що поєднує глибоку (DL) і класичну (ML) обробку ознак та вводить спеціалізований набір цифрових відбитків пакета, орієнтованих саме на шкідливий зашифрований трафік. Автори детально проаналізували існуючі методики формування ознак, сформували власну, а також склали комплексний датасет із публічних джерел для повноцінного навчання DL моделі. У порівняльних експериментах їхня дворівнева архітектура перевершила ResNet і Random Forest, що підтверджує ефективність комбінованого підходу.

В [10] запропоновано нову інформаційну технологію виявлення ботнетів на основі аналізу поведінки ботнетів у корпоративній мережі. Виявлення ботнетів виконується двома способами: за допомогою аналізу на рівні мережі та на рівні хосту. Один підхід дозволяє аналізувати поведінку програмного забезпечення на хості, що може вказувати на можливу присутність бота безпосередньо в хості та ідентифікувати шкідливе програмне забезпечення, а інший передбачає моніторинг та аналіз DNS трафіку, що дозволяє зробити висновок про зараження хостів мережі ботом ботнету.

У статті [11] представлено метод виявлення ботнетів у корпоративних мережах. Він заснований на використанні алгоритмів штучної імунної системи. Запропонований підхід дозволяє відрізнити нешкідливий мережевий трафік від шкідливого за допомогою алгоритму клонального відбору з урахуванням особливостей присутності ботнету в мережі.

В роботі [12] автори акцентують, що поширення хмарних сервісів, вимоги privacy-by-design та Zero-Trust архітектур підвищують попит на DLP, але одночасно ускладнюють менеджмент таких проєктів. Вміщення продуктивності в рамки політик безпеки, точна класифікація даних і мінімізація ризику від інсайдерів залишаються ключовими перешкодами. Як перспективні напрямки огляд виділяє інтеграцію DLP з XDR платформами, використання ML для динамічних політик і появу cloud-native DLP, що підтримує гібридні та хмарні сценарії.

У дослідженні [13] запропонували метод запобігання витокам даних у блокчейн-орієнтованій енергомережі IoT, який поєднує NER підхід DeBERTa-BiLSTM-CRF із традиційними регулярними виразами для виявлення чутливої інформації як у структурованих, так і в неструктурованих повідомленнях між платформою мережі та сторонніми системами. Модель, натренована на наборі CLUENER 2020, досягла $F1 = 81,26\%$, що демонструє значне поліпшення порівняно з класичними regex правилами та розширює сферу застосування DLP-технологій до складних галузевих даних.

Автори [14] розвинули ідею статистичного підходу до DLP, запропонували модель класифікації документів на основі вдосконаленого градієнтного бустингу (IGBCA), що використовує TF-IDF векторизацію та машинне навчання для оцінки ризику витоку до надання доступу. Автори доводять, що IGBCA підвищує точність класифікації порівняно зі стандартними методами (regex, fingerprinting) і дозволяє ефективно захищати дані.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка та оцінка ефективності комбінованого підходу, який інтегрує механізми DLP системи з виявленням ботнет активності у корпоративних мережах, забезпечуючи контроль руху критичної інформації й автоматизоване блокування каналів екфільтрації в реальному часі.

Основні завдання дослідження: 1) синтезувати гібридну архітектуру детекції; 2) розробити механізми автоматизованого моніторингу, виявлення, реагування та захисту критичної інформації; 3) провести експериментальне дослідження і перевірити ефективність запропонованого рішення.

Виклад основного матеріалу. Запропонована архітектура системи оброблення критичної інформації складається з шести основних вузлів (рисунок 1).

Кінцева станція є джерелом і споживачем інформації. На ній користувач створює, копіює чи передає файли, а також ініціює мережеві з'єднання. Агент DLP, що працює на цій станції на рівні операційної системи або драйвера файлової системи, аналізує вміст документів, маркує їх за ступенем конфіденційності, фіксує дії користувача і формує події про потенційний витік. Сенсор ботнетів відслідковує мережевий трафік і розпізнає підозрілі шаблони обміну даними, характерні для ботнета. Консоль інцидентів отримує повідомлення від обох сенсорів, об'єднує їх у єдину часову стрічку подій, додає контекст про користувача, пристрій і клас даних, надає оператору візуалізацію та забезпечує API для автоматичних дій. Модуль політик

інтерпретує ці події через заздалегідь задані правила та адаптивні порогові моделі, визначає, чи слід блокувати, шифрувати або лише журналювати інцидент. Модуль реагування отримує рішення від політик, перетворює його на конкретні технічні дії. Він надсилає агенту команду блокування або шифрування файлів, вносить правило до міжмережевого екрана чи проксі, аби перервати ботнет канал. Після виконання захисних дій він повертає підтвердження у консоль для аудиту системи.

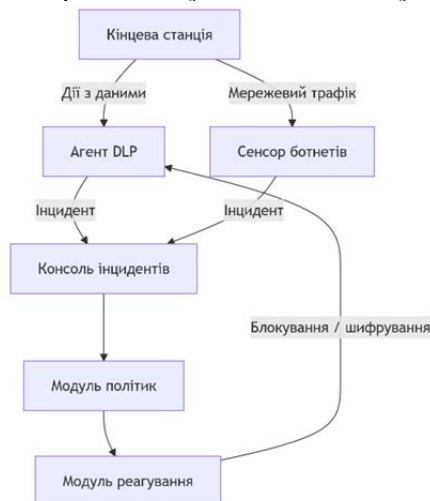


Рисунок 1 – Архітектура системи

Джерело: розроблено авторами

Алгоритм роботи системи. На кінцевій станції користувач працює з файлами й водночас генерує мережевий трафік. Обидва потоки даних рухаються до різних компонентів. Локальні операції одразу фіксує агент DLP, який оцінює, наскільки чутливим є контент і чи відповідають дії політикам безпеки. Тим часом копія мережевого трафіку надходить до сенсора ботнетів, що аналізує його й сигналізує про можливу активність. Контентний і мережевий модулі формують події та надсилають їх у консоль інцидентів, де інформація зводиться в єдиний запис і збагачується контекстом про користувача й систему. Далі консоль передає зведений інцидент у модуль політик, який визначає рівень ризику й ухвалює, чи слід втручатися. Прийняте рішення потрапляє до модуля реагування, який у разі потреби надсилає агенту на станції команду заблокувати або зашифрувати файл і одночасно додає правило блокування адреси чи домену на мережевому рівні. Після виконання дії підтвердження повертається назад у консоль, закриваючи цикл і забезпечуючи повний журнал подій для аудиту й подальшого вдосконалення системи.

Експериментальне дослідження ефективності. Для оцінки працездатності комбінованої системи створюється ізольоване лабораторне середовище з кількома віртуальними робочими станціями, які виконують звичайні офісні сценарії та одночасно відтворюють інфіковану поведінку. На кожному хості встановлюється агент DLP, а копія мережевого трафіку спрямовується на сенсор ботнетів. У межах експерименту генерується два типи діяльності. Перший - легітимна діяльність, редагування документів різних класів конфіденційності, збереження їх у мережевій папці, надсилання електронною поштою та синхронізація з хмарним сховищем. Другий - контрольовані атаки, відбувається імітація роботи ботнета, який намагається ексфільтрувати файли, попередньо позначені агентом як критичні. Система фіксує, скільки часу минає від моменту запуску шкідливого каналу до появи інциденту у консолі, яку дію обирає модуль політик і як швидко модуль реагування блокує передачу. Паралельно ведеться підрахунок хибних спрацювань, перевіряється чи не потрапили в карантин допустимі операції користувача і чи не був заблокований легітимний мережевий ресурс. Після серії з кількох сотень ітерацій обчислюються

середні показники, істинно позитивна та хибно позитивна частка, середній час виявлення і середній час до фактичного блокування.

Завершальний етап полягає у спробі вручну передати критичний файл за каналом, який система щойно заблокувала. Передача не відбувається, а файл на станції заблокований, експеримент підтверджує, що інтегрований підхід успішно перериває витік навіть за умов активного ботнет трафіку. Результати експериментів представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати експериментів

Сценарії	Кількість подій	Спрацювання системи	Істинно позитивні, %	Хибно позитивні, %	Середній час виявлення, с	Середній час блокування, с
Легітимні дії користувача	400	6	-	1.5	-	-
Витік тільки через DLP канал (без ботнетів)	120	118	98.3	1.7	0.72	1.2
Ботнет трафік без критичних файлів	100	96	96	4.0	0.81	-
Витік критичних файлів через ботнет	80	79	98.8	1.2	0.85	1.35
Підсумок по всіх сценаріях	700	299	97.8	2.2	0.79	1.28

Джерело: розроблено авторами

Для ботнет трафіку без критичних файлів система не виконує блокування файлу, тому параметр «час блокування» не вимірювався.

Система продемонструвала високу стійкість. Із 700 протестованих подій вона коректно ідентифікувала 97,8% небезпечних ситуацій, утримавши частку хибно позитивних спрацювань на рівні 2,2%. Середній час між появою шкідливої активності й формуванням інциденту склав 0,79 с, а повне припинення ексфільтрації критичних даних відбувалося за 1,28 с. Лише шість разів система помилково спрацювала на легітимні дії користувача, що є прийнятним для реальних корпоративних середовищ. Показники підтверджують, що комбінований підхід де взаємодія мережевих ботнет ознак із класифікацією DLP ефективно блокує витіки даних й майже не заважає законній роботі співробітників.

Висновки. Проведене дослідження довело, що інтеграція DLP системи з системою виявлення ботнетів забезпечує високий рівень захисту корпоративних даних. Запропонована архітектура формує єдиний цикл моніторинг - виявлення - реагування - захист і здатна задіяти захисну дію за півтори секунди після початку ексфільтрації, зберігаючи при цьому помірну, у межах двох відсотків частку хибних спрацювань. Кореляція мережевих індикаторів керування ботнетом із класом чутливості даних дозволяє пріоритизувати інциденти й перекривати саме ті канали, які несуть максимальний ризик для організації.

Попри отримані результати, залишаються напрями, що потребують подальших досліджень. Особливої уваги потребує мобільний і IoT сегмент, поява ботнетів типу FluBot показала, що пристрої поза периметром компанії стають плацдармом для витоку.

Отже, щоб надійно захистити критично важливі дані, компанії мають впроваджувати комплексну багатошарову стратегію, яка поєднує сучасні технології, детально прописані правила безпеки, безперервний моніторинг і системне підвищення кваліфікації співробітників. Інтегруючи актуальні DLP-платформи з іншими інструментами кіберзахисту, організація суттєво зменшує ймовірність витоку та

зберігає стійкість своїх інформаційних ресурсів у середовищі зростаючих цифрових загроз.

Список літератури

1. Kapko M. Infostealers fueled cyberattacks and snagged 2.1B credentials last year. *CyberScoop*. 2025. 18 March. URL: <https://cyberscoop.com/infostealers-cybercrime-surged-2024-flashpoint/> (дата звернення: 02.04.25).
2. Whitmore W. Today's Attack Trends - Unit 42 Incident Response Report. *Palo Alto Networks*. 2024. 28 February. URL: <https://www.paloaltonetworks.com/blog/2024/02/unit-42-incident-response-report/> (дата звернення: 02.04.25).
3. Barry C. Top threats of the 2024 botnet landscape. *Barracuda*. 2025. 21 March. URL: <https://blog.barracuda.com/2025/03/21/top-threats-of-the-2024-botnet-landscape> (дата звернення: 02.04.25).
4. Patel, V., Shukla, H., Raval, A. Enhancing botnet detection with machine learning and explainable AI: a step towards trustworthy AI security. *IJFMR*. 2025. 7(2). 39353 URL: <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i02.39353> (дата звернення: 03.04.25).
5. Alshaeaa, H. Y., Ghadhbhan, Z. M. Developing a hybrid feature selection method to detect botnet attacks in IoT devices. *Kuwait Journal of Science*. 2024. 51(3). 100222. URL: <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100222> (дата звернення: 03.04.25).
6. Sousa, B., Dias, D., Antunes, N., Cámara, G., Wagner, R., Schmerl, B., Garlan, D., Fidalgo, P. MONDEO-Tactics5G: Multistage botnet detection and tactics for 5G/6G networks. *Computer Security*. 2024. 140. 103768. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103768> (дата звернення: 03.04.25).
7. Savenko, O., Sachenko, A., Lysenko, S., Markowsky, G., Vasylykiv, N. Botnet detection approach based on the distributed systems. *International Journal of Computing*. 2020. 19(2). 190-198. URL: <https://doi.org/10.47839/ijc.19.2.1761> (дата звернення: 03.04.25).
8. Lysenko, S., Savenko, O., Bobrovnikova, K. DDoS botnet detection technique based on the use of the semi-supervised fuzzy c-means clustering. 2018. *CEUR-WS*. 2104. 688-695. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2104/paper_251.pdf
9. Wang, Z., Thing, V. Feature mining for encrypted malicious traffic detection with deep learning and other machine learning algorithms. 2023. *Computers & Security*. 128. 103143. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103143> (дата звернення: 03.04.25).
10. Lysenko, S., Savenko, O., Bobrovnikova, K., Kryshchuk, A., Savenko, B. Information technology for botnets detection based on their behaviour in the corporate area network. in: Gaj, P., Kwiecień, A., Sawicki, M. (eds) *Computer Networks. CN 2017. Communications in Computer and Information Science*. 2017. vol 718. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-59767-6_14 (дата звернення: 05.04.25).
11. Lysenko, S., Bobrovnikova, K., Savenko, O. A botnet detection approach based on the clonal selection algorithm. *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. 2018. Kyiv Ukraine. 424-428. URL: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409171> (дата звернення: 05.04.25).
12. Noman, A. Advancements and best practices in data loss prevention: A comprehensive review. *ResearchGate*. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/387325365_Advancements_and_Best_Practices_in_Data_Loss_Prevention_A_Comprehensive_Review (дата звернення: 05.04.25).
13. Miao, W., Zhao, X., Zhang, Y., Chen, S., Li, X., Li, Q. A deep learning-based method for preventing data leakage in electric power industrial internet of things business data interactions. *Sensors*. 2024. 24(13). 4069. URL: <https://doi.org/10.3390/s24134069> (дата звернення: 05.04.25).
14. Gupta, K., Kush, A. A learning oriented DLP system based on classification model. *arXiv*. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.13711> (дата звернення: 05.04.25).

References

1. Kapko, M. (2025, March 18). Infostealers fueled cyberattacks and snagged 2.1B credentials last year. *CyberScoop*. <https://cyberscoop.com/infostealers-cybercrime-surged-2024-flashpoint/>
2. Whitmore, W. (2024, February 28). Today's attack trends: Unit 42 incident response report. *Palo Alto Networks Blog*. <https://www.paloaltonetworks.com/blog/2024/02/unit-42-incident-response-report/>
3. Barry, C. (2025, March 21). Top threats of the 2024 botnet landscape. *Barracuda Blog*. <https://blog.barracuda.com/2025/03/21/top-threats-of-the-2024-botnet-landscape>
4. Patel, V., Shukla, H., & Raval, A. (2025). Enhancing botnet detection with machine learning and explainable AI: A step towards trustworthy AI security. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 7(2), Article 39353. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i02.39353>
5. Alshaeaa, H. Y., & Ghadhbhan, Z. M. (2024). Developing a hybrid feature selection method to detect botnet attacks in IoT devices. *Kuwait Journal of Science*, 51(3), Article 100222. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100222>

6. Sousa, B., Dias, D., Antunes, N., Cámara, G., Wagner, R., Schmerl, B., Garlan, D., & Fidalgo, P. (2024). MONDEO-Tactics5G: Multistage botnet detection and tactics for 5G/6G networks. *Computers & Security*, 140, Article 103768. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103768>
7. Savenko, O., Sachenko, A., Lysenko, S., Markowsky, G., & Vasylyuk, N. (2020). Botnet detection approach based on the distributed systems. *International Journal of Computing*, 19(2), 190–198. <https://doi.org/10.47839/ijc.19.2.1761>
8. Lysenko, S., Savenko, O., & Bobrovnikova, K. (2018). DDoS botnet detection technique based on the use of the semi-supervised fuzzy c-means clustering. *CEUR Workshop Proceedings*, 2104, 688–695. https://ceur-ws.org/Vol-2104/paper_251.pdf
9. Wang, Z., & Thing, V. (2023). Feature mining for encrypted malicious traffic detection with deep learning and other machine learning algorithms. *Computers & Security*, 128, Article 103143. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103143>
10. Lysenko, S., Savenko, O., Bobrovnikova, K., Kryshchuk, A., & Savenko, B. (2017). Information technology for botnets detection based on their behaviour in the corporate area network. In P. Gaj, A. Kwiecień, & M. Sawicki (Eds.), *Computer Networks: CN 2017* (Communications in Computer and Information Science, 718). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59767-6_14
11. Lysenko, S., Bobrovnikova, K., & Savenko, O. (2018). A botnet detection approach based on the clonal selection algorithm. In *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)* (pp. 424–428). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409171>
12. Noman, A. (2024). Advancements and best practices in data loss prevention: A comprehensive review. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/387325365_Advancements_and_Best_Practices_in_Data_Loss_Prevention_A_Comprehensive_Review
13. Miao, W., Zhao, X., Zhang, Y., Chen, S., Li, X., & Li, Q. (2024). A deep learning-based method for preventing data leakage in electric power industrial internet of things business data interactions. *Sensors*, 24(13), 4069. <https://doi.org/10.3390/s24134069>
14. Gupta, K., & Kush, A. (2023). A learning oriented DLP system based on classification model. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.13711>

Oleksandr Huralnyk, Oleg Savenko, Prof., Doctor of Technical Sciences
Khmelnitskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

Processing Critical Information in Corporate Networks Based on a Combined Approach of a DLP System with a Botnet Detection System

This paper aims to develop a multi-layered cyber defense concept that combines content-aware data loss prevention and botnet detection. The goal is to provide full visibility into critical data flows in corporate networks, block leakage channels in real time, and maintain an acceptably low false positive rate. To achieve this goal, we synthesize a hybrid monitoring-detection-response-protection architecture and verify its performance in a controlled laboratory environment.

As a result of the study, an architecture of six logical nodes was formed. The end station became both a source and a consumer of data; users generated files and network sessions on it. The installed DLP agent successfully classified documents by confidentiality level, recorded actions, and generated events about a possible leak. The deployed botnet sensor timely detected characteristic anomalies in the traffic. Both event streams were consolidated into a single incident console, where they were supplemented with user, device, and data class context. The policy engine then correctly assessed the risk based on adaptive thresholds and made decisions on blocking, encrypting, or logging. The response engine implemented this decision, sent an order to the agent to block or encrypt files, and synchronously set network rules that interrupted the botnet channel. After performing the actions, the system returned confirmation to the console, ensuring a complete audit cycle.

The integrated solution correctly processed 97.8% of malicious events, while keeping false positives at 2.2%. The median detection time remained below 0.8 seconds, and full containment of critical data occurred within 1.3 seconds of the attack. The results confirm that correlating botnet behavior with data classification context dramatically reduces noise and speeds up response. By integrating up-to-date DLP platforms with other cybersecurity tools, an organization significantly reduces the likelihood of leakage and maintains the resilience of its information resources in an environment of growing digital threats.

botnet, DLP, data exfiltration, critical information, corporate networks

Одержано (Received) 02.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 05.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 004.8-9

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.70-78](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.70-78)

О. В. Лозинська, О. О. Марків, доц., канд. техн. наук, **В. А. Висоцька**, доц., д-р техн. наук
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна
e-mail: olha.v.lozynska@lpnu.ua, oksana.o.markiv@lpnu.ua, victoria.a.vysotska@lpnu.ua

Метод виявлення розповсюджувачів дезінформації на основі графового представлення структури соціальної мережі

У роботі розглянуто проблему поширення та виявлення дезінформації в соціальних мережах. На основі проведеного аналізу, досліджено, що проблема виявлення дезінформації тісно пов'язана насамперед з проблемою виявлення розповсюджувачів даної дезінформації. Запропоновано метод виявлення розповсюджувачів дезінформації на основі представлення соціальної мережі у вигляді орієнтованого графа, з поділом користувачів на спільноти. Введено класифікацію вузлів (сусідні, граничні та основні) та показано, яку роль вони відіграють у поширенні інформації. Проведено аналіз україномовного датасету новин, що включає понад 2000 записів, з метою виявлення користувачів, які потенційно можуть стати розповсюджувачами інформації (як правдивої так і неправдивої). Отримані результати демонструють, що граничні та окремі основні вузли є ключовими для передачі фейкової інформації всередині спільнот. Запропонований підхід дає змогу підвищити ефективність виявлення потенційних розповсюджувачів дезінформації.

дезінформація, фейкові новини, датасет, розповсюджувачі дезінформації, графи

Постановка проблеми. Соціальні мережі є невід'ємною частиною повсякденного життя. Люди використовують різні платформи соціальних мереж для спілкування з близькими та рідними, а також використовують їх як основне джерело новин. Проте, не завжди соціальні медіа-платформи містять правдиву інформацію. Дуже часто вони використовуються для масового поширення дезінформації. Науковці з усього світу намагаються розробити ефективні методи та засоби для розпізнавання неправдивої інформації, так званих фейкових новин. Все частіше дослідники зосереджуються лише на методах виявлення достовірності інформації, але важливо не тільки виявляти фейкову інформацію, але й визначати людей, які її читають і відповідно поширюють. Розроблення стратегій виявлення дезінформації може допомогти стримати та запобігти швидкому її поширенню в соціальних мережах. Таким чином, постає проблема не тільки виявлення фейкових новин, а насамперед виявлення їх розповсюджувачів. Серед способів поширення дезінформації також потрібно виділити координовану неавтентичну поведінку користувачів акаунтів. Щоб виявити координовану неавтентичну поведінку, потрібно або використовувати подібність у поведінці користувачів, проаналізовану за допомогою мереж або часову синхронність між користувачами. Авторами статті досліджено відомі методи виявлення розповсюджувачів інформації у соціальних мережах, проведено аналіз цих методів та запропоновано використання графів для подання спільнот користувачів у соціальних мережах. На основі цього методу обчислено кількість основних, граничних та сусідніх вузлів у датасеті україномовних новин. Також досліджено, які вузли можуть стати розповсюджувачами інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість робіт що стосуються виявлення дезінформації зосереджено на виявленні вмісту новини або самої новини.

Малий відсоток наукових робіт, які зосереджені на виявленні користувачів, що найімовірніше поширюють фейкові новини. Перші наукові роботи в цій області використовували загальні функції метаданих користувача, такі як кількість підписників, ім'я профілю користувача, електронну адресу тощо для виявлення підозрілих профілів. Науковці [1] проаналізували понад 100 мільйонів повідомлень, зібраних із Twitter протягом одного місяця та виділили дві категорії спамерів, що відрізняються за поведінкою, і які використовують різні стратегії розсилання спаму.

У роботі [2] досліджено автоматичні методи оцінки достовірності певного набору твітів. Автори аналізують дописи мікроблогів, пов'язані з «трендовими» темами, і класифікують їх як такі, які заслуговують довіри, або не заслуговують. Для цього використовуються особливості поведінки користувачів при розміщенні та повторному розміщенні публікацій («повторне твітування»). Результати досліджень показують, що існують вимірювані відмінності в способах поширення повідомлень, які можна використовувати для автоматичної класифікації їх як достовірних чи недостовірних, з точністю та запам'ятовуванням у діапазоні від 70% до 80%.

Науковці [3] проводили дослідження психологічного профілю людей, які стають жертвами фейкових новин. Результати їхнього дослідження свідчать про те, що віра у фейкові новини певною мірою може бути зумовлена загальною тенденцією до надмірного сприйняття людиною слабких тверджень. Автори статті [4] проаналізували характеристики та мотиваційні фактори розповсюджувачів фейкових новин у соціальних мережах за допомогою психологічних теорій та досліджень поведінки. У наукових роботах [5, 6] автори створили реальні набори даних, які вимірюють рівень довіри користувачів до фейкових новин, і виділили репрезентативні групи як «досвідчених» користувачів, які здатні розпізнавати фейкові новини як неправдиві, так і «наївних» користувачів, які з більшою ймовірністю повірять фейковим новинам. Після цього провели порівняльний аналіз явних і прихованих характеристик профілю між цими групами користувачів, що розкриває їхній потенціал для розрізнення фейкових новин.

У роботі [7] запропоновано методіку для визначення, чи буде автор стрічки Twitter поширювати фейкові новини. Автори показали можливість автоматичного визначення потенційних розповсюджувачів фейкових новин у Twitter і труднощі їх ідентифікації. Авторами [8] запропоновано структуру на основі керованого машинного навчання для профілювання розповсюджувачів фейкових новин. Розроблений метод ґрунтується на поєднанні індивідуальних особливостей великої п'ятірки (привітність, сумлінність, екстраверсія, емоційний діапазон, відкритість) та стилOMETричних характеристик.

У роботі [9] запропоновано метод визначення чи хоче автор каналу Twitter бути розповсюджувачем фейкових новин з використанням класифікатора методу опорних векторів (SVM) із функціями n-грам символів і слів. Автори [10] також використали символні n-грами як функції в поєднанні з лінійною SVM для англійської мови та логістичної регресії для іспанської мови. Їхні моделі досягають загальної точності 73% і 79% на офіційних тестах англійською та іспанською мовами відповідно.

У праці [11] запропоновано модель CheckerOrSpreader, яка може класифікувати користувача як такого, що перевіряє факти, або потенційного розповсюджувача фейкових новин. Розроблена модель заснована на згортковій нейронній мережі і поєднує вбудовування слів із функціями, які представляють особистісні риси користувачів і мовні моделі, що використовуються в їхніх твітах.

Інші наукові дослідження продемонстрували переваги графових моделей на основі уваги для моделювання та виявлення чуток [12]. У науковій роботі представлено модель глибокої уваги на основі рекурентних нейронних мереж для ідентифікації чуток. Масштабні експерименти на реальних наборах даних, зібраних із веб-сайтів соціальних мереж, демонструють, що модель на основі глибокої уваги перевершує ті моделі, які покладаються на функції, створені вручну та здатна виявляти чутки швидше і точніше.

Для виявлення фейкових новин автори статті [13] запропонували мережеву модель згортки графів, яка використовує шляхи поширення для виявлення фейкових новин. Авторами розроблено нову модель двонаправленого графа під назвою Bi-Directional Graph Convolutional Networks (Bi-GCN), щоб досліджувати поширення чуток як зверху вниз, так і знизу вгору.

Науковці [14] розробили мережу уваги з урахуванням графів, яка використовує уявлення користувачів і шляхи поширення інформації, щоб передбачити фейкові новини. У роботі [15] запропоновано структуру індуктивного навчання FANG (Factual News Graph), яка використовує графові нейронні мережі для представлення соціальної структури та виявлення фейкових новин. FANG краще вловлює соціальний контекст у високоточному представленні порівняно з іншими графічними та неграфічними моделями. Зокрема, FANG дає значні покращення для завдання виявлення фейкових новин і є надійним у випадку обмежених навчальних даних.

У праці [16] досліджено розповсюдження всіх підтверджених правдивих і неправдивих новин, поширених у Twitter з 2006 по 2017 рік. Дані містять приблизно 126 000 історій, які твітнули близько 3 мільйонів людей понад 4,5 мільйона разів. Результати досліджень виявили, що неправдиві новини були більш новими, ніж правдиві, що свідчить про те, що люди частіше ділилися новою інформацією. Крім того, фейки поширювались значно далі й швидше, ніж правда, у всіх категоріях інформації. Тоді як неправдиві історії викликали у відповідях страх, огиду та здивування, правдиві історії викликали очікування, смуток, радість та довіру.

Автори [17] запропонували баєсівську непараметричну модель для розуміння ролі контенту в поширенні правдивих і неправдивих новин і відмінностей між ними. Розроблена модель була навчена на базі даних реальної соціальної мережі та здатна краще прогнозувати мітки новин, ніж сучасніші нейронні мережі та моделі Баєса.

Ще одним із способів поширення дезінформації є координована неавтентична поведінка користувачів, яка проявляється у створенні кількох фейкових акаунтів із залученням якнайбільше користувачів та поширенням однакової інформації (новин, постів, твітів) за певний період. При цьому ці акаунти посилаються один на одного або на одне й те саме джерело. Такі новини найчастіше подаються із заголовком, який одразу привертає увагу (написаний великими літерами, із знаками оклику або ж це якась сенсація). Метою поширення такої інформації є ввести читачів в оману, створити для них інформаційну ілюзію, коли вони будуть читати лише повідомлення, які містять дезінформацію.

Щоб виявити координовану неавтентичну поведінку, потрібно або використовувати подібність у поведінці користувачів, проаналізовану за допомогою мереж або часову синхронність між користувачами. Перший підхід зазвичай включає такі аналітичні кроки, як побудова зваженої мережі подібності користувача, фільтрація такої мережі, виявлення різних скоординованих спільнот у мережі та вивчення їх масштабу та моделей координації. Провівши аналіз наукових досліджень, варто зазначити, що для розрізнення автентичної та неавтентичної поведінки користувачів потрібно розробити методи їх ідентифікації. Більшість вчених просто вважають, що

певні рівні координації завжди вказують на зловмисну поведінку. Інші дослідники натомість запропонували поєднати аналіз координації та пропаганду, як спосіб ідентифікації шкідливих скоординованих спільнот.

На основі проведеного аналізу наукових робіт, які переважно аналізують вміст повідомлення (новини), наш підхід використовує графове представлення структури соціальної мережі для подання зв'язків між користувачами.

Постановка завдання. Метою дослідження є розроблення методу виявлення розповсюджувачів дезінформації з використанням графового представлення структури соціальної мережі. Для вирішення цього завдання потрібно: провести аналіз методів та стратегій виявлення дезінформації, які можуть допомогти стримати та запобігти швидкому її поширенню в соціальних мережах; використати графові структури для подання зв'язків між користувачами у соціальній мережі; на основі датасету україномовних новин здійснити підрахунки та передбачити користувачів, які, швидше за все, стануть розповсюджувачами інформації (правдивої чи неправдивої).

Виклад основного матеріалу. Для того, щоб зрозуміти як поширюються новини у соціальній мережі, представимо цю мережу у вигляді зв'язного орієнтованого графа, де кожна вершина (вузол) являє собою користувача. Користувачі пов'язані між собою ребрами та об'єднані у різні спільноти. Рівень довіри усередині спільноти значно вищий, ніж між користувачами різних спільнот. Таким чином, якщо всередині такої спільноти пошириться дезінформація, ймовірність зараження всіх членів спільноти буде високою. Для прикладу розглянемо граф, зображений на рис. 1.

Граф включає сім спільнот вузлів (вершин), де індекс вузла позначає спільноту, до якої він належить. У контексті будь-якої соціальної мережі орієнтоване ребро $L_1 \rightarrow K_1$ означає, що L_1 стежить за K_1 . Таким чином, будь-яка новина (пост) йде від K_1 до L_1 . Якщо L_1 вирішує зробити репост новини K_1 , це значить, що L_1 схвалив новину K_1 і що L_1 довіряє K_1 . Червоним кольором зображені вузли (користувачі), які поширили неправдиву інформацію, синім кольором – інші вузли.

Оскільки довіра усередині спільноти висока, то чим більше L довіряє K , тим вищий шанс, що L зробить репост поста K і таким чином поширить повідомлення K , незалежно від того, чи воно правдиве або неправдиве. На рис. 1 показано поширення фейкових новин, починаючи з N_1 , коли вони поширюються мережею через K_3 до K_7 .

Як приклад, розглянемо два сценарії виявлення розповсюджувача фейкових новин:

1. Інформація досягає границь спільноти. Розглянемо приклад, коли повідомлення поширюється через N_1 , який є вузлом, що з'єднує спільноти 1 і 3. Вузол K_3 піддається впливу та, ймовірно, поширить інформацію, таким чином розпочавши поширення інформації в заданій пов'язаній спільноті. Таким чином, важливо передбачити вузли на границі спільнот, які, ймовірно, стануть розповсюджувачами інформації.

2. Інформація проникає в спільноту. Розглянемо приклад, коли вузол K_3 вирішує поширити повідомлення. Вузли L_3 , N_3 і O_3 , які є безпосередніми послідовниками K_3 , тепер доступні для інформації. Через їхню близькість вони вразливі для того, щоб повірити даному вузлу. Подібним чином, для спільноти 7, коли повідомлення досягло вузла K_7 , вузли N_7 і R_7 знаходяться на відстані одного кроку. Інтуїтивно зрозуміло, що в тісній структурі спільноти, якщо один із вузлів вирішить поширити частину інформації, ймовірність її швидкого поширення серед усієї спільноти дуже висока. Таким чином, важливо виявляти вузли в межах спільноти, які, ймовірно, стануть розповсюджувачами інформації, щоб захистити здоров'я всієї спільноти.

Розглянемо основні принципи оцінки здоров'я спільноти [18]. Соціальна мережа має характерну властивість демонструвати структури спільноти, які формуються на

основі взаємодії між вершинами. Спільноти, як правило, є модульними групами, де члени всередині групи тісно пов'язані, а учасники міжгрупових зв'язків слабкі. Таким чином, члени спільноти, як правило, мають вищий рівень довіри один до одного, ніж між членами різних спільнот. Якщо такі спільноти піддаються фейковим новинам, що поширюються поблизу нього, ймовірність зараження всіх членів спільноти буде високою. Керуючись ідеєю легкого поширення в спільноті, використано модель оцінки стану здоров'я в спільноті [18]. Модель визначає три типи вузлів по відношенню до спільноти: сусідні, граничні та основні вузли:

1. Сусідні вузли: ці вузли безпосередньо приєднані принаймні до одного вузла спільноти. Набір сусідніх вузлів позначається $N_{сп}$. Вони не є частиною спільноти.

2. Граничні вузли: це вузли спільноти, які безпосередньо приєднані принаймні до одного сусіднього вузла. Множину граничних вузлів позначимо $V_{сп}$. Важливо зазначити, що лише вузли спільноти, які мають граничне ребро до сусідніх вузлів, знаходяться в $V_{сп}$.

3. Основні вузли: це вузли спільноти, які пов'язані лише з членами спільноти. Набір основних вузлів позначається $C_{сп}$.

У табл. 1 зазначено сусідні, граничні та основні вузли для спільнот, що зображені на рис. 1.

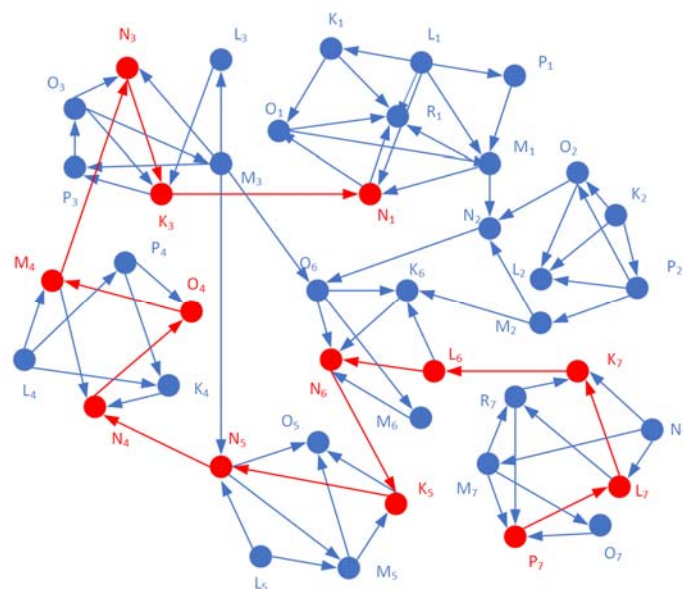


Рисунок 1 – Приклад графового представлення структури мережі спільнот для виявлення розповсюджувачів фейкових новин

Джерело: розроблено на підставі [18]

Таблиця 1 – Сусідні, граничні та основні вузли для спільнот користувачів соціальної мережі

№ Сп	$N_{сп}$	$V_{сп}$	$C_{сп}$
1	N_2	M_1	$K_1, L_1, N_1, O_1, P_1, R_1$
2	K_6, O_6	M_2, N_2	K_2, L_2, O_2, P_2
3	N_1, N_5, O_6	K_3, M_3	L_3, N_3, O_3, P_3
4	N_3	M_4	K_4, L_4, N_4, O_4, P_4
5	N_4	N_5	K_5, L_5, M_5, O_5
6	K_5	N_6	K_6, L_6, M_6, O_6
7	L_6	K_7	$L_7, M_7, N_7, O_7, P_7, R_7$

Джерело: розроблено авторами

Для даного завдання було проаналізовано датасет [19], що містить 2174 записів новин з різною інформацією. Кожен запис містить дату, час, текст самого повідомлення, мітку (правда-фейк), пост/репост, джерело, автор повідомлення, мову, якою написано повідомлення, кількість поширень, кількість вподобайок, та покликання на саме джерело. Таким чином, можна прослідкувати коли різні користувачі акаунтів почали поширювати одну й ту саму неправдиву інформацію. Кількість записів із міткою «правда» становить 1283, а з міткою «фейк» – 891 запис.

Запропонований метод виявлення розповсюджувачів інформації полягає у наступному. Припустимо, що є певна соціальна мережа (ω), яка складається зі спільнот користувачів ($\text{com} \in \omega$) і кожна спільнота має чітко визначені сусідні вузли ($N_{\text{сп}}$), граничні вузли ($B_{\text{сп}}$) і основні вузли ($C_{\text{сп}}$). Нам потрібно передбачити граничні вузли b , які, швидше за все, стануть розповсюджувачами інформації ($b_{\text{роз}}$) у спільноті користувачів, оскільки вони найбільш дотичні до всіх решта вузлів спільноти. Таким же ж чином потрібно зробити обрахунки, щоб передбачити основні вузли c , які, швидше за все, стануть розповсюджувачами інформації усередині самої спільноти ($c_{\text{роз}}$). Статистику датасету україномовних новин із зазначенням кількості різних типів вузлів, ребер та підрахунку розповсюджувачів інформації наведено у табл. 2. Таким чином, якщо дезінформація потрапить до граничних вузлів $b_{\text{роз}}$ (у нашому датасеті таких є 11), вона розповсюдиться по всій спільноті. Кількість розповсюджувачів $b_{\text{роз}}$ правдивої інформації згідно обрахунків становить 14. Крім того, виявлено, що найчастіше поширюють фейкову інформацію користувачі, в яких більшість постів на сторінці є фейковими. Це може свідчити, що даний акаунт є фейковим.

Таблиця 2 – Статистика зібраного датасету україномовних новин

	Фейк	Правда
Кількість вузлів	451	645
Кількість ребер	1532	1967
Кількість розповсюджувачів	58	97
Кількість вузлів у N	115	182
Кількість вузлів $n_{\text{роз}}$ у N	39	73
Кількість вузлів у B	102	204
Кількість вузлів $b_{\text{роз}}$ у B	11	14
Кількість вузлів у C	234	386
Кількість вузлів $c_{\text{роз}}$ у C	8	10

Джерело: розроблено авторами

Подяка. Дана стаття підготована завдяки грантової підтримки Національного Фонду Досліджень України, реєстраційний номер проєкту 33/0012 від 3/03/2025 (2023.04/0012) «Розроблення інформаційної системи автоматичного виявлення джерел дезінформації та неавтентичної поведінки користувачів чатів» за конкурсом «Наука для зміцнення обороноздатності України».

Висновки. У результаті дослідження було розроблено метод виявлення розповсюджувачів дезінформації у соціальних мережах з урахуванням внутрішньої структури спільнот. Соціальну мережу подано у вигляді зв'язного орієнтованого графа, де кожен вузол являє собою користувача. Користувачі пов'язані між собою ребрами та об'єднані у різні спільноти. Досліджено, що граничні вузли $b_{\text{роз}}$ мають вирішальне значення для поширення інформації між спільнотами, а основні вузли – для розповсюдження всередині спільноти. Аналіз реального датасету підтвердив, що фейкова інформація здебільшого поширюється акаунтами з великою часткою фейкових

постів, що свідчить про ймовірність їх фейковості. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності систем автоматичного виявлення дезінформації і забезпечення інформаційної безпеки.

В подальших дослідженнях планується здійснити обрахунки пари оцінок «довіра-надійність» для кожного вузла мережі, використовуючи алгоритм довіри до соціальних медіа (TSM).

Список літератури

1. Almaatouq A., Shmueli E., Nouh M., Alabdulkareem A., Singh V.K., Alsaleh M., Alarifi A., Alfaris A., Pentland A. If it looks like a spammer and behaves like a spammer, it must be a spammer: analysis and detection of microblogging spam accounts. *International Journal of Information Security*. 2016. Vol. 15, № 5. P. 475–491. URL: <https://doi.org/10.1007/s10207-016-0321-5> (дата звернення: 10.03.2025).
2. Castillo C., Mendoza M., Poblete B. Information credibility on twitter. 20th international conference on World wide web, 2011. P. 675–684. URL: <https://doi.org/10.1145/1963405.1963500> (дата звернення: 10.03.2025).
3. Pennycook G., Rand D.G. Who falls for fake news? The roles of bullshit receptivity, overclaiming, familiarity, and analytic thinking. *Journal of Personality*. 2020. Vol. 88(2). P.185–200. URL: <https://doi.org/10.1111/jopy.12476> (дата звернення: 10.03.2025).
4. Karami M., Nazer T.H., Liu H. Profiling fake news spreaders on social media through psychological and motivational factors. 32nd ACM conference on hypertext and social media, 2021. P. 225–230. URL: <https://doi.org/10.1145/3465336.347509> (дата звернення: 10.03.2025).
5. Shu K., Wang S., Liu H. Understanding user profiles on social media for fake news detection. 2018 IEEE conference on multimedia information processing and retrieval (MIPR), 2018. P. 430–435. DOI: 10.1109/MIPR.2018.00092 (дата звернення: 10.03.2025).
6. Shu K., Wang S., Liu H. Beyond news contents: the role of social context for fake news detection. Twelfth ACM international conference on web search and data mining, 2019. P. 312–320 URL: <https://doi.org/10.1145/3289600.3290994> (дата звернення: 10.03.2025).
7. Rangel F., Giachanou A., Ghanem B.H.H., Rosso P. Overview of the 8th author profiling task at pan 2020: profiling fake news spreaders on Twitter. 11th International Conference of the CLEF Association, 2020. Vol. 2696. DOI: 10.1007/978-3-030-58219-7_25 (дата звернення: 10.03.2025).
8. Cardaioli M., Ceconello S., Conti M., Pajola L., Turrin F. Fake news spreaders profiling through behavioural analysis. Working Notes of Conference and Labs of the Evaluation Forum, 2020. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2696/paper_113.pdf (дата звернення: 10.03.2025).
9. Pizarro J. Using n-grams to detect fake news spreaders on Twitter. Working Notes of Conference and Labs of the Evaluation Forum, 2020. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2696/paper_181.pdf (дата звернення: 10.03.2025).
10. Vogel I., Meghana M. Fake news spreader detection on Twitter using character n-grams. Working Notes of Conference and Labs of the Evaluation Forum, 2020. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2696/paper_59.pdf (дата звернення: 10.03.2025).
11. Giachanou A., Rissola E.A., Ghanem B., Crestani F., Rosso P. The role of personality and linguistic patterns in discriminating between fake news spreaders and fact checkers. *International conference on applications of natural language to information systems*. Springer. 2020. P. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-030-51310-8_17. (дата звернення: 10.03.2025).
12. Chen T., Li X., Yin H., Zhang J. Call attention to rumors: Deep attention based recurrent neural networks for early rumor detection. *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. Vol. 11154. P. 40–52. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.05973> (дата звернення: 05.04.2025).
13. Bian T., Xiao X., Xu T., Zhao P., Huang W., Rong Y., Huang J. Rumor detection on social media with bi-directional graph convolutional networks. *AAAI*. 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.06362> (дата звернення: 10.03.2025).
14. Lu Y., Li C. GCAN: Graph-aware Co-Attention Networks for Explainable Fake News Detection on Social Media. 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2020. P. 505–514. URL:

- <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.11648> (дата звернення: 05.04.2025).
15. Nguyen V., Sugiyama K., Nakov P., Kan M. FANG: Leveraging Social Context for Fake News Detection Using Graph Representation. 29th ACM International Conference on Information and Knowledge Management, 2020. P. 1165 – 1174. URL: <https://doi.org/10.1145/3340531.3412046> (дата звернення: 15.03.2025).
 16. Vosoughi S., Roy D., Aral S. The spread of true and false news online. Science. 2018. Vol. 359, No. 6380. P. 1146–1151. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aap9559> (дата звернення: 15.03.2025).
 17. Kim J., Kim D., Oh A. Homogeneity-based transmissive process to model true and false news in social networks. 12th ACM International Conference on Web Search and Data Mining, 2019. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.09702> (дата звернення: 20.03.2025).
 18. Rath B., Gao W., Srivastava J. Evaluating vulnerability to fake news in social networks: a community health assessment model. 2019 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM), 2019. DOI: 10.1145/3341161.3342920 (дата звернення: 20.03.2025).
 19. Лозинська О., Марків О., Висоцька В., Романчук Р., Назаркевич М. Інформаційна технологія розроблення та наповнення датасету дезінформації з використанням інтелектуального пошуку дипфейків та клікбейтів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2024. № 343, т. 6(1). С. 158-167. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-24> (дата звернення: 20.03.2025).

References

1. Almaatouq, A., Shmueli, E., Nouh, M., Alabdulkareem, A., Singh, V.K., Alsaleh, M., Alarifi, A., Alfaris, A., & Pentland, A. (2016). If it looks like a spammer and behaves like a spammer, it must be a spammer: analysis and detection of microblogging spam accounts. *International Journal of Information Security*. 15 (5), 475-491. <https://doi.org/10.1007/s10207-016-0321-5>.
2. Castillo, C., Mendoza, M., & Poblete, B. (2011). Information credibility on Twitter. 20th international conference on World wide web (675–684). <https://doi.org/10.1145/1963405.1963500>.
3. Pennycook, G., & Rand, D.G. (2020). Who falls for fake news? The roles of bullshit receptivity, overclaiming, familiarity, and analytic thinking. *Journal of Personality*. 88(2), 185–200. <https://doi.org/10.1111/jopy.12476>.
4. Karami, M., Nazer, T.H., & Liu, H. (2021). Profiling fake news spreaders on social media through psychological and motivational factors. 32nd ACM conference on hypertext and social media (225–230). <https://doi.org/10.1145/3465336.347509>.
5. Shu, K., Wang, S., & Liu, H. (2018). Understanding user profiles on social media for fake news detection. 2018 IEEE conference on multimedia information processing and retrieval (430–435). DOI: 10.1109/MIPR.2018.00092.
6. Shu, K., Wang, S., & Liu, H. (2019). Beyond news contents: the role of social context for fake news detection. Twelfth ACM international conference on web search and data mining (312–320). URL: <https://doi.org/10.1145/3289600.3290994>.
7. Rangel, F., Giachanou, A., Ghanem, B.H.H., & Rosso, P. (2020). Overview of the 8th author profiling task at pan 2020: profiling fake news spreaders on Twitter. 11th International Conference of the CLEF Association. DOI: 10.1007/978-3-030-58219-7_25.
8. Cardaioli, M., Cecconello, S., Conti, M., Pajola L., & Turrin F. (2020). Fake news spreaders profiling through behavioural analysis. Working Notes of Conference and Labs of the Evaluation Forum. https://ceur-ws.org/Vol-2696/paper_113.pdf.
9. Pizarro, J. (2020). Using n-grams to detect fake news spreaders on Twitter. Working Notes of Conference and Labs of the Evaluation Forum. https://ceur-ws.org/Vol-2696/paper_181.pdf.
10. Vogel, I., & Meghana, M. (2020). Fake news spreader detection on Twitter using character n-grams. Working Notes of Conference and Labs of the Evaluation Forum. https://ceur-ws.org/Vol-2696/paper_59.pdf.
11. Giachanou, A., Rissola, E.A., Ghanem, B., Crestani, F., & Rosso, P. (2020). The role of personality and linguistic patterns in discriminating between fake news spreaders and fact checkers. International conference on applications of natural language to information systems (181–192). DOI: 10.1007/978-3-030-51310-8_17.
12. Chen, T., Li, X., Yin, H., & Zhang, J. (2018). Call attention to rumors: Deep attention based recurrent neural networks for early rumor detection. *Lecture Notes in Computer Science*. 11154, 40-52. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.05973>.

13. Bian, T., Xiao, X., Xu, T., Zhao, P., Huang, W., Rong, Y., & Huang, J. (2020). Rumor detection on social media with bi-directional graph convolutional networks. AAAI 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.06362>.
14. Lu, Y., & Li, C. (2020). GCAN: Graph-aware Co-Attention Networks for Explainable Fake News Detection on Social Media. 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (505–514). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.11648>.
15. Nguyen, V., Sugiyama, K., Nakov, P., & Kan, M. (2020). FANG: Leveraging Social Context for Fake News Detection Using Graph Representation. 29th ACM International Conference on Information and Knowledge Management (1165 – 1174). <https://doi.org/10.1145/3340531.3412046>.
16. Vosoughi, S., Roy, D., & Aral, S. (2018). The spread of true and false news online. *Science*. 359 (6380), 1146–1151. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aap9559>.
17. Kim, J., Kim, D., & Oh, A. (2019). Homogeneity-based transmissive process to model true and false news in social networks. 12th ACM International Conference on Web Search and Data Mining. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.09702>.
18. Rath, B., Gao, W., & Srivastava, J. (2019). Evaluating vulnerability to fake news in social networks: a community health assessment model. 2019 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM). DOI: 10.1145/3341161.3342920.
19. Lozynska, O., Markiv, O., Vysotska, V., Romanchuk, R., & Nazarkevych, M. (2024). Information technology for developing and populating a disinformation dataset using intelligent deepfakes and clickbait search. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 343(6(1)), 158-167. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-24> [in Ukrainian].

Olga Lozynska, Oksana Markiv, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Victoria Vysotska**, Assoc. Prof., Doct. tech. sci.
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

A Method for Detecting Disinformation Spreaders Based on a Graph Representation of the Social Network Structure

The paper considers the problem of disinformation dissemination and detection in social networks. Based on the analysis, it was found that the problem of disinformation detection is closely related, first of all, to the problem of detecting disinformation distributors. A method for detecting disinformation spreaders is proposed based on the representation of a social network in the form of a directed graph, with the division of users into communities.

In the study, the social network is presented as a connected directed graph, where each node represents a user. Users are connected to each other by edges and are united into different communities. The level of trust within a community is much higher than between users of different communities. Thus, if misinformation spreads within such a community, the probability of infection of all members of the community will be high. We introduce a classification of nodes (neighboring, border, and main) and show the role they play in the dissemination of information. An analysis of a Ukrainian-language news dataset, including over 2000 records, is conducted to identify users who can potentially become disseminators of information (both true and false). The number of items with the label “true” is 1283, and with the label “fake” is 891. We need to predict the boundary nodes, which are most likely to become information spreaders in the user community, since they are most tangential to all other nodes in the community. In the same way, calculations need to be made to predict the main nodes, which are most likely to become information distributors within the community itself. Thus, if disinformation reaches the boundary nodes (there are 11 of them in our dataset), it will spread throughout the community. In addition, it was found that users who have fake posts on the page are most likely to spread fake information. This may indicate that this account is fake.

This study introduces a method for identifying misinformation spreaders in online social networks. The findings highlight that boundary nodes serve as conduits for inter-community dissemination, while core nodes play a significant role within their respective communities. The result of research using a real-world Ukrainian news dataset demonstrates that users who predominantly share fake posts are more likely to spread disinformation, potentially indicating the use of fake accounts. These insights can inform the design of advanced detection algorithms and support efforts to safeguard the information integrity of digital communication platforms. Further studies are planned to calculate a pair of “trust-reliability” scores for each network node using the Trust in Social Media (TSM) algorithm.

disinformation, fake news, dataset, disinformation spreaders, graphs

Одержано (Received) 23.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 30.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025

УДК: 004.056, 004.62

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.79-86](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.79-86)Д. І. Прокопович-Ткаченко¹, доц., канд. техн. наук,Л. В. Рибальченко¹, доц., канд. екон. наук, Я. О. Деркач²¹Університет митної справи та фінансів, м. Дніпро, Україна²Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

e-mail: omega2417@gmail.com, Luda_r@ukr.net, ciscoflexx@gmail.com

Підвищення ефективності стеганографічних систем на основі глибоких автоенкодерів у контексті інформаційної безпеки

В статті розглядаються можливості застосування глибоких автоенкодерів у сфері приховування інформації (стеганографії). Показано, що поєднання методів стеганографії з глибинним навчанням дає змогу підвищити надійність системи та збільшити пропускну здатність каналу передавання прихованих даних.

Здійснено порівняльний огляд сучасних архітектур автоенкодерів, проаналізовано принципи кодування та декодування, а також наведено узагальнені результати експериментальних досліджень, що демонструють ефективність запропонованих підходів. Оцінено перспективи розвитку даного напрямку з огляду на безпеку, ефективність та стійкість до атак шляхом детального аналізу потенційних вразливостей і сценаріїв практичного впровадження.

Результати дослідження свідчать про значний потенціал глибоких автоенкодерів у галузі інформаційної безпеки, зокрема для інтеграції зі стеганографічними методами. Запропоновано низку рекомендацій щодо подальшого вдосконалення технології, включно з оптимізацією архітектури нейронних мереж, поширенням сфери застосувань та урахуванням етичних і правових аспектів.

глибокі автоенкодери, стеганографія, інформаційна безпека, глибинне навчання, нейронні мережі

Постановка проблеми. У сучасному цифровому світі питання захисту конфіденційної інформації потребує не лише криптографічних методів, а й ефективного приховування самого факту передавання даних. Передавання та зберігання секретних даних, а також забезпечення їх конфіденційності вимагають ефективних методів протидії несанкціонованому доступу. Традиційна криптографія орієнтована на шифрування змісту повідомлень, тоді як стеганографія намагається приховати сам факт існування секретних даних. Класичні стеганографічні моделі демонструють обмеження у стійкості до атак та в обсязі даних, що можуть бути приховані. Глибокі нейронні мережі, зокрема автоенкодери, відкривають нові можливості для створення більш захищених та продуктивних стеганографічних систем. Висока швидкість обміну інформацією й різноманітність носіїв (зображення, аудіо, відео тощо) зумовлюють постійну потребу в пошуку нових, більш витончених методів приховування, здатних протидіяти дедалі складнішим атакам на інформаційні системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Незважаючи на значні успіхи в застосуванні автоенкодерів до таких задач, як стиснення зображень [3], відновлення змінених даних [4] та виявлення аномалій [5], їхній потенціал у стеганографії ще не повністю розкрито. Існує низка теоретичних моделей, що описують межі пропускну здатності та стійкості стеганографічних систем. Більшість таких моделей базується на класичних статистичних підходах, тоді як методи глибинного навчання лише починають активно вбудовуватися в ці структури [6,7,8]. Досліджуються також питання ідентифікації емоцій людини із застосуванням нейромережі та методів для розпізнавання зображень [18]. Існують підходи до нейромережевого розпізнавання мімічних мікровиразів обличчя людини із використанням навчання глибокої нейромережі [19]. Важливою проблемою залишається збалансування між максимально

можливим обсягом прихованих даних, мінімальними спотвореннями носія та складністю детектування факту стеганографії.

Постановка завдання. Метою даної роботи є підвищення ефективності та стійкості стеганографічних систем шляхом розробки та експериментального обґрунтування застосування глибоких автоенкодерів для приховування інформації. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- розробити методику оцінювання ефективності глибоких автоенкодерів у задачах стеганографії за критеріями пропускну здатності, стійкості та захищеності;
- провести дослідження із застосуванням різних архітектур автоенкодерів і типів носіїв (зображень, аудіо);
- визначити параметри нейронних мереж, які критично впливають на ефективність приховування та декодування даних;
- провести аналіз потенційних вразливостей та сценаріїв атак для розроблених моделей;
- сформулювати рекомендації щодо подальшого вдосконалення стеганографічних систем на основі глибинного навчання.

Виклад основного матеріалу. Розвиток глибинного навчання (deep learning) відкриває широкі перспективи для підсилення класичних стеганографічних підходів. Застосування глибоких нейронних мереж дає змогу збільшити пропуску здатність каналу стеганографічного приховування, підвищити стійкість до атак, зокрема, до компресії, додавання шуму та інших спотворень [1,2] та адаптуватися до різних типів носіїв та специфічних вимог безпеки дасть можливість визначити нові інструменти для оптимізації процесу приховування інформації. Наукова новизна полягає у поєднанні ідей стеганографії та глибинних автоенкодерів, що дає змогу отримати високу якість відновлення прихованої інформації за мінімальних візуальних, акустичних або інших артефактів.

Загальний підхід до дослідження включає архітектуру глибоких автоенкодерів з критеріями оцінювання якості приховування інформації та параметрами проведених експериментів і передбачає поетапну побудову та навчання автоенкодера, інтеграцію стеганографічного модуля та перевірку ефективності отриманої системи [9,10].

Схематично процес можна уявити таким чином, що під час кодування (encoding) на вхід автоенкодера одночасно подаються носій і приховане повідомлення, після чого формується стеганограмне представлення (модифікований носій), а при декодуванні (decoding) на вхід декодера подається стеганограмний сигнал, і модель намагається відновити оригінальне приховане повідомлення. Для забезпечення виконання стеганографічної функції вихід декодера додатково контролюється спеціалізованою втратою (loss-функцією), яка враховує якість відновлення прихованих даних. Також враховується критерій схожості між стеганограмним і вихідним носієм [11].

Припустимо, що маємо вхідне зображення X розміром $H \times W$ та приховане повідомлення M розміром $h \times w$. Позначимо функцію автоенкодера як $f_{\theta}(\cdot)$, де θ - набір параметрів (ваг і зсувів нейронної мережі). Тоді стеганограмне зображення S можна розглядати як:

$$S = f_{\theta}(X, M) \# (1)$$

де вихід S повинен бути максимально близьким до X за певною метрикою (наприклад, MSE або SSIM), але водночас забезпечувати можливість відновити M при декодуванні. Декодер моделюється функцією $g_{\phi}(\cdot)$:

$$\hat{M} = g_{\phi}(S), \# (2)$$

де ϕ - параметри декодера. Цільова функція (загальна втрата) складається з двох основних компонент:

$$\mathcal{L} = \lambda_1 \cdot \text{Loss}_{\text{cover}}(X, S) + \lambda_2 \cdot \text{Loss}_{\text{message}}(M, \hat{M}),$$

де $\text{Loss}_{\text{cover}}$ оцінює ступінь спотворення носія, а $\text{Loss}_{\text{message}}$ - якість відновлення прихованого повідомлення. Коефіцієнти λ_1 та λ_2 визначають вагомість кожної складової [15, 16].

Розбиття даних: вихідний датасет зображень поділяється на набір для навчання (train), валідації (validation) та тестування (test). Ініціалізація мережі: параметри θ і ϕ ініціалізуються випадково. Прямий прохід: для кожної міні-вибірки обчислюються S за формулою (1) та $\hat{M}$ за формулою (2). Обчислення втрат: розраховується $\mathcal{L}$ з урахуванням $\text{Loss}_{\text{cover}}(X, S)$ та $\text{Loss}_{\text{message}}(M, \hat{M})$. Зворотне поширення помилки: виконується оптимізація (наприклад, методом Adam) для оновлення θ і ϕ . Валідація: на основі окремого валідаційного набору порівнюються зміни метрик $\text{Loss}_{\text{cover}}$, $\text{Loss}_{\text{message}}$ та обчислюються додаткові показники (PSNR, SSIM, тощо). Тестування: після завершення навчання мережі перевіряються на окремому тестовому наборі для оцінки узагальненої здатності.

Для об'єктивності результатів виконано кілька незалежних запусків моделі з різними початковими ініціалізаціями. Для кожної серії обчислено середні значення та стандартне відхилення низки показників: PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), дБ, SSIM (Structural Similarity Index Measure) та Bit Error Rate (BER) для прихованого повідомлення. Порівняння показників проводилося за допомогою одновибіркового та двовибіркового t -тесту, а також методом ANOVA для визначення статистично значущих відмінностей. Отримані результати дозволяють зробити висновок про реплікованість і стабільність роботи запропонованого підходу (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати обробки візуальних даних для автоенкодера

Параметр	Значення
Тип автоенкодера	Convolutional Autoencoder (CAE)
Кількість згорткових шарів	4-6 (залежно від експерименту)
Розмір латентного простору	128-256
Функції активації	ReLU, Sigmoid
Функція втрат	MSE + бінарна крос-ентропія
Оптимізатор	Adam (learning rate = 0.001)
Розмір міні-вибірки (batch size)	16, 32
Кількість епох	50-100
Датасет	Зображення (формат PNG), аудіо (формат WAV)

Джерело: розроблено авторами

Запропонована комбінація згорткових шарів для обробки візуальних даних та адаптована функція втрат для одночасного збереження якості носія і відновлення прихованого повідомлення є логічною еволюцією класичних автоенкодерів (табл. 1). Саме ця схема дозволяє оптимально використати властивості надмірності зображення або аудіо, а також модифікувати носій у важковиявний спосіб. Крім того, використання регуляризації (dropout, L2) слугує для зниження ризику перенавчання та підвищення стійкості до незначних відхилень у даних. Таким чином, описаний підхід забезпечує систематичну і прозору процедуру розробки та тестування глибоких автоенкодерів із метою застосування у стеганографії.

Для більшої наочності наведено числові дані, графіки навчання та приклади отриманих стеганограм. Першим кроком досліджено, як змінюється функція втрат (loss) при різній кількості епох навчання та з різними параметрами (learning rate, batch size). Типовий графік для Convolutional Autoencoder наведено на рис. 1.

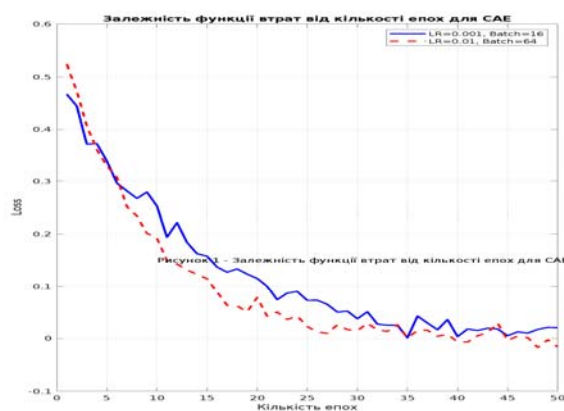


Рисунок 1 - Залежність функції втрат від кількості епох для CAE

Джерело: розроблено авторами

З рис.1 видно, що початкові значення loss швидко знижуються протягом перших 20-30 епох, після чого крива навчання стабілізується. Подальше збільшення кількості епох дає незначне покращення, що вказує на можливість зупинитися раніше для уникнення перенавчання. Таким чином, на відповідність кожної кривої певній комбінації Learning rate та Batch size: LR=0.001, Batch=16 — низький темп навчання, малий розмір пакета; LR=0.01, Batch=64 — високий темп навчання, великий пакет.

Чим нижче крива, тим ефективніше знижується функція втрат під час навчання.

В таблиці 2 виконано узагальнене порівняння якості приховування основних показників для різних варіантів автоенкодерів і класичних методів стеганографії (наприклад, LSB).

Таблиця 2 - Узагальнене порівняння якості приховування основних показників для різних методів

Метод	PSNR (дБ)	SSIM	BER (%)	Пропускна здатність (bpp)
LSB (класичний)	35.2	0.94	4.8	0.25
Fully-Connected AE	38.5	0.96	3.2	0.30
Convolutional AE	39.8	0.97	2.7	0.35
Variational AE	39.2	0.96	3.0	0.32

Джерело: розроблено авторами

З таблиці 2 видно, що Convolutional AE дає найкращі показники PSNR та SSIM, а також відносно низький BER, пропускна здатність (bpp) теж максимальна у випадку згорткових автоенкодерів, класичний метод LSB демонструє нижчу якість, особливо при вищому коефіцієнті вбудовування даних.

Візуальна оцінка стеганографічних результатів є важливою складовою експерименту. На рис. 2 наведено приклад зображення та стеганограми (CAE), а також різницю (помножену на певний коефіцієнт для покращення видимості), де світліші тони свідчать про більшу різницю.

Візуально відмінність між вихідним і стеганограмним зображенням мінімальна, що підтверджується високим показником SSIM (0.97). Утім, це стосується даного

випадку, при збільшенні розміру прихованого повідомлення (підвищенні bpp) артефакти можуть ставати помітнішими.

Для перевірки стійкості до атак, розглянуто декілька найпоширеніших типів атак: додавання шуму (Gaussian, Salt&Pepper), JPEG-компресія із різним рівнем стиснення та перетворення Фур'є з вибіркоким урізанням високочастотних складових.

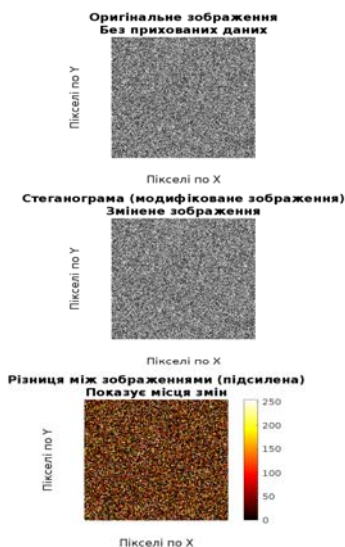


Рисунок 2 - Приклад оригінального зображення та стеганограми (CAE)

Джерело: розроблено авторами

Дослідження показало, що Convolutional AE демонструє кращу стійкість до шумів, зберігаючи допустимий рівень BER (до 5 – 7%) навіть при значному рівні Gaussian шуму. У випадку JPEG-компресії ефективність суттєво падає лише при дуже низькій якості (Quality < 40%). Таким чином, результати підтверджують, що глибокі автоенкодері здатні більш гнучко адаптувати стеганографічне вбудовування до різних умов і забезпечувати вищу стійкість, аніж класичні методи.

Початкове припущення про те, що глибокі автоенкодері зможуть підвищити ефективність стеганографії шляхом одночасної оптимізації двох цілей (збереження якості носія та надійного відновлення прихованого повідомлення), підтвердилося. Експериментальні дані показали, що при аналогічному рівні помітності (PSNR, SSIM) можна збільшити пропускну здатність у порівнянні з класичними методами (LSB), а стійкість до атак (зокрема, шумових) виявилася вищою завдяки здатності нейронних мереж узагальнювати приховані ознаки [14].

Виконавши порівняння з роботами [15,16,17], можна сказати, що результати узгоджуються з тенденцією використання глибинних моделей у стеганографії. Згорткові автоенкодері часто переважають варіаційні за показниками якості та стійкості, проте VAE пропонують більшу гнучкість у генеруванні нових варіантів стеганограм. Таким чином, вибір конкретної архітектури може залежати від пріоритетів: якщо важливіша вища пропускну здатність і менше артефактів - доцільно застосовувати CAE; якщо критичне значення має адаптивність і можливість навчатися на малих обсягах даних - VAE можуть бути вигіднішими.

Дослідження зображень дають змогу отримати загальні висновки, що для аудіо та відео носіїв можуть знадобитися інші архітектурні рішення (наприклад, рекурентні або 3D-згорткові мережі). Відбувається залежність від обсягу даних. Глибокі мережі потребують великої кількості даних для якісного навчання. У випадку специфічних застосувань (наприклад, медичні зображення з обмеженим доступом) можливо виникнуть ускладнення. Налаштування гіперпараметрів (кількість шарів, розмір латентного простору, коефіцієнти втрат) потребує значних обчислювальних ресурсів і досвіду.

Перспективами подальших досліджень є оптимізація архітектури мережі. Застосування автоматизованого пошуку (NAS - Neural Architecture Search) для вибору найкращого набору шарів та параметрів. Поєднання з іншими нейромережевими підходами. Зокрема, GAN (Generative Adversarial Networks) для покращення непомітності або Transformers для обробки послідовних даних (аудіо/відео). Для підвищення стійкості до атак відбувається дослідження механізмів адаптивних шумів, змінного шуму, атак типу "man-in-the-middle" у мережі. Масове застосування стеганографії з автоенкодерами може викликати занепокоєння стосовно незаконного використання, тому важливо розробляти механізми легального контролю та виявлення.

Результати підтверджують перспективність використання глибоких автоенкодерів, але водночас вказують на необхідність подальших досліджень для подолання поточних обмежень і викликів.

Висновки. В результаті проведеного комплексного дослідження, застосування глибоких автоенкодерів у стеганографії, підвищилася ефективність та стійкість стеганографічних систем за рахунок використання глибоких автоенкодерів для приховування даних у цифрових носіях. Отримані результати дозволили досягнути поставлену мету та задачі, а також сформулювати висновки та рекомендації:

- розроблена методика оцінювання ефективності глибоких автоенкодерів показала високу стійкості до атак та захищеність за критеріями пропускну здатності;
- проведені дослідження дозволили підвищити показники PSNR і SSIM, а також зменшити рівень BER, зберігаючи високу пропускну здатність каналу стеганографії;
- використання різних архітектур автоенкодерів та носіїв інформації (зображень, аудіофайлів) дали можливість встановити, що глибокі мережі виявилися толерантнішими до низки атак. Зокрема, навіть при додаванні суттєвого шуму рівень відновлення прихованого повідомлення залишається прийнятним. Хоча основною базою експериментів були зображення, потенційно аналогічні принципи можуть бути перенесені на аудіо та відео. Таким чином, можна стверджувати про вагомий внесок глибоких автоенкодерів у розвиток сучасної стеганографії, особливо з погляду мінімізації помітності стеганограм і збільшення надійності системи;
- оцінювання якості та стійкості приховування та визначення найбільш критичних параметрів, які впливають на ефективність. Запропонована концепція спільного навчання кодувальника та декодувальника під стеганографічним контролем розширює модельні уявлення про можливості автоенкодерів у задачах приховування інформації.

Рекомендаціями та напрямками подальших досліджень вважається застосування та впровадження методів adversarial training з метою підвищення надійності декодування в умовах активних атак. В якості розширення архітектур пропонується використання 3D-згорткових автоенкодерів для відео або рекурентних мереж для аудіо, що покращить результати у спеціалізованих сценаріях.

Застосування глибоких автоенкодерів дозволило істотно підвищити якість приховування інформації при мінімальному погіршенні якості носія та забезпечити вищу пропускну здатність стеганографічного каналу. У порівнянні з класичними методами, модель продемонструвала вищу стійкість до атак і здатність до генералізації. Таким чином, мету дослідження досягнуто в повному обсязі.

Результати дослідження можуть бути використані в різних галузях інформаційної безпеки, зокрема як: цифрові водяні знаки для захисту авторських прав; приховане передавання повідомлень у каналах зв'язку, стійких до перехоплення; безпека IoT-пристроїв, де важливо мінімізувати обсяг даних і водночас зберегти секретність. Запропонована методика може бути додатково вдосконалена шляхом інтеграції криптографічного шифрування прихованого повідомлення, що сприятиме підвищенню загального рівня безпеки.

Список літератури

1. Zhu J., Kaplan R., Johnson J., Fei-Fei L. HiDDeN: Hiding data with deep networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2018. Vol. 31.
2. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016.
3. Zhou C., Paffenroth R. Anomaly detection with robust deep autoencoders. *Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2017. P. 665–674. URL: <http://doi.org/10.1145/3097983.3098052>.
4. Hayes J., Danezis G. Generating steganographic images via adversarial training. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30.
5. Montgomery D. C. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2017.
6. Gupta S., Joshi R. C., Misra M. A. SeGAN: Segment-based image steganography using generative adversarial network. *IET Image Processing*. 2019. Vol. 13, No. 10. P. 1706–1713. URL: <http://doi.org/10.1049/iet-ipr.2018.6233>.
7. Lu X., Li B., Huang J. GAN-based image steganography: review and research trends. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 179097–179110. URL: <http://10.1109/ACCESS.2019.2958574>.
8. Zhang R., Wang S., Wang L. Robust deep steganography with pixelwise adversarial training. *Neural Computing and Applications*. 2021. Vol. 33. P. 2357–2369. URL: <http://doi.org/10.1007/s00521-020-05047-2>.
9. Nissar A. U., Mir A. H. Classification of steganalysis techniques: A study. *Digital Signal Processing*. 2010. Vol. 20, No. 6. P. 1758–1770. URL: <http://doi.org/10.1016/j.dsp.2010.01.017>.
10. Li B., Luo X., Liu T., Huang J. A survey on image steganography and steganalysis. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*. 2011. Vol. 2, No. 2. P. 142–172.
11. Ker A. D. Steganalysis of LSB matching in grayscale images. *IEEE Signal Processing Letters*. 2005. Vol. 12, No. 6. P. 441–444. URL: <http://doi.org/10.1109/LSP.2005.847889>.
12. Petitcolas F. A. P., Anderson R. J., Kuhn M. G. Information hiding - a survey. *Proceedings of the IEEE*. 1999. Vol. 87, No. 7. P. 1062–1078. URL: <http://doi.org/10.1109/5.771065>.
13. Reddy A., Acharya N., Mandal J. K. A new approach to transform domain-based robust steganography using wavelet families. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018. Vol. 43. P. 5079–5090. URL: <http://doi.org/10.1007/s13369-018-3205-0>.
14. Liu Z., Su Z., Hou D., Li H. A robust CNN-based method for image steganography and steganalysis. *Multimedia Tools and Applications*. 2018. Vol. 77. P. 21769–21785. URL: <http://doi.org/10.1007/s11042-018-6089-1>.
15. Tang S., Wu X. Adaptive steganography based on deep reinforcement learning. *Neurocomputing*. 2020. Vol. 370. P. 35–46. URL: <http://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.08.090>.
16. Yu W., Chen S. Improved autoencoder-based image steganography. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 41395–41406. URL: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3064091>.
17. Duan Y., Yang B., Gao H. Deep hiding in video frames with convolutional neural networks // *Information Sciences*. 2021. Vol. 551. P. 27–43. URL: <http://doi.org/10.1016/j.ins.2020.11.038>.
18. Мельник К.В., Мельник В.М., Коптюк Ю.Ю. Дослідження методів розпізнавання зображень на основі нейронних мереж. *Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво"*. Луцьк, 2019. Вип. № 35. С. 161–165.
19. Яровий А.А., Кашубін С.Г., Кулик О.О. Розпізнавання мімічних мікровиразів обличчя людини. *Системи технічного зору та штучного інтелекту з обробкою та розширюванням зображень*. Вінниця: ВНТУ, 2015. С.76–83.

References

1. Zhu J., Kaplan R., Johnson J. & Fei-Fei L. (2018). *HiDDeN: Hiding data with deep networks*. *Advances in Neural Information Processing Systems*. Vol. 31.
2. Goodfellow I., Bengio Y. & Courville A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
3. Zhou C. & Paffenroth R. (2017). *Anomaly detection with robust deep autoencoders*. *Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. P. 665–674. <http://doi.org/10.1145/3097983.3098052>.
4. Hayes J. & Danezis G. (2017). *Generating steganographic images via adversarial training*. *Advances in Neural Information Processing Systems*. Vol. 30.
5. Montgomery D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
6. Gupta S., Joshi R. C. & Misra M. A. (2019). *SeGAN: Segment-based image steganography using generative adversarial network*. *IET Image Processing*. Vol. 13, No. 10. P. 1706–1713. <http://doi.org/10.1049/iet-ipr.2018.6233>.
7. Lu X., Li B. & Huang J. (2019). *GAN-based image steganography: review and research trends*. *IEEE Access*. Vol. 7. P. 179097–179110. <http://10.1109/ACCESS.2019.2958574>.
8. Zhang R., Wang S. & Wang L. (2021). *Robust deep steganography with pixelwise adversarial training*. *Neural Computing and Applications*. Vol. 33. P. 2357–2369. <http://doi.org/10.1007/s00521-020-05047-2>

9. Nissar A. U. & Mir A. H. (2010). *Classification of steganalysis techniques: A study*. Digital Signal Processing. Vol. 20, No. 6. P. 1758–1770. <http://doi.org/10.1016/j.dsp.2010.01.017>.
10. Li B., Luo X., Liu T. & Huang J. (2011). *A survey on image steganography and steganalysis*. Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Vol. 2, No. 2. P. 142–172.
11. Ker A. D. (2005). *Steganalysis of LSB matching in grayscale images*. IEEE Signal Processing Letters. Vol. 12, No. 6. P. 441–444. <http://doi.org/10.1109/LSP.2005.847889>.
12. Petitcolas F. A. P., Anderson R. J. & Kuhn M. G. (1999). *Information hiding - a survey*. Proceedings of the IEEE. Vol. 87, No. 7. P. 1062–1078. <http://doi.org/10.1109/5.771065>.
13. Reddy A., Acharya N. & Mandal J. K. (2018). *A new approach to transform domain-based robust steganography using wavelet families*. Arabian Journal for Science and Engineering. Vol. 43. P. 5079–5090. <http://doi.org/10.1007/s13369-018-3205-0>.
14. Liu Z., Su Z. & Hou D., Li H. (2018). *A robust CNN-based method for image steganography and steganalysis*. Multimedia Tools and Applications. Vol. 77. P. 21769–21785. <http://doi.org/10.1007/s11042-018-6089-1>.
15. Tang S. & Wu X. (2020). *Adaptive steganography based on deep reinforcement learning*. Neurocomputing. Vol. 370. P. 35–46. <http://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.08.090>.
16. Yu W. & Chen S. (2021). *Improved autoencoder-based image steganography*. IEEE Access. Vol. 9. P. 41395–41406. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3064091>.
17. Duan Y., Yang B., & Gao H. (2021). *Deep hiding in video frames with convolutional neural networks* // Information Sciences. Vol. 551. P. 27–43. <http://doi.org/10.1016/j.ins.2020.11.038>.
18. Melnyk, K.V., Melnyk, V.M., & Koptiyuk, Y.Y. (2019). Research of image recognition methods based on neural networks. *Scientific journal «Computer-integrated technologies: education, science, production»*. Lutsk. Issue No. 35. C. 161-165 [in Ukrainian].
19. Yarovyi, A.A., Kashubin, S.G., & Kulyk, O.O. (2015). Recognition of mimic microexpressions of the human face. *Systems of technical vision and artificial intelligence with image processing and stratification*. Vinnitsia: VNTU. C.76-83 [in Ukrainian].

Dmytro Prokopovych-Tkachenko¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

Liudmyla Rybalchenko¹, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Yaroslav Derkach**²

¹University of Customs and Finance, Dnipro, Ukraine

²Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Steganographic Methods in Information Security

The article discusses the possibilities of using deep autoencoders in the field of information hiding (steganography). It is shown that the combination of steganography methods with deep learning makes it possible to improve system reliability and increase the bandwidth of the hidden data transmission channel.

The purpose of this paper is to analyse modern approaches to the use of deep autoencoders in steganography, to determine their main advantages and disadvantages, and to formulate promising directions for further research. The development of deep learning opens up broad prospects for enhancing classical steganographic approaches. The use of deep neural networks allows increasing the bandwidth of the steganographic concealment channel, increase resistance to attacks, in particular, to compression, noise and other distortions and adapt to different types of media and specific security requirements will allow identifying new tools for optimising the process of information concealment. The scientific novelty lies in the combination of the ideas of steganography and deep auto-encoders, which makes it possible to obtain high quality recovery of hidden information with minimal visual, acoustic or other artefacts.

A comparative review of modern autoencoder architectures is carried out, the principles of encoding and decoding are analysed, and the results of experimental studies demonstrating the effectiveness of the proposed approaches are summarised. The prospects for the development of this area in terms of security, efficiency and resistance to attacks are assessed through a detailed analysis of potential vulnerabilities and practical implementation scenarios.

The results of the study indicate the significant potential of deep autoencoders in the field of information security, in particular for integration with steganographic methods. A number of recommendations for further improvement of the technology are proposed, including optimisation of the neural network architecture, expansion of the scope of applications, and consideration of ethical and legal aspects.

The results of the study can be used in various areas of information security, including: digital watermarks for copyright protection; covert transmission of messages in communication channels resistant to interception; security of IoT devices, where it is important to minimise the amount of data and at the same time maintain secrecy. The methodology itself can be improved by integrating additional encryption at the level of the hidden message, which will increase the overall level of security.

deep autoencoders, steganography, information security, deep learning, neural networks

Одержано (Received) 21.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.892.5;621.822.5

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.87-98](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.87-98)

І. В. Віштак, доц., канд. техн. наук, А. С. Мельченко

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

e-mail: vishtakiv@vntu.edu.ua

Вплив режимів шліфування на основні параметри якості поверхневих шарів газових підшипників та їх експлуатаційні властивості

У статті досліджено вплив режимів шліфування на якість поверхневих шарів газових підшипників та їхні експлуатаційні властивості. Розглянуто вплив азотування та комбінованих технологій, зокрема нітрогартування, на твердість і зносостійкість сталей. Проаналізовано метод електро-ерозійного алмазного шліфування (ЕАШ) та його термодинамічні характеристики. Особливу увагу приділено формуванню білих шарів (БШ) аустенітно-мартенситного походження та факторам, що впливають на їхню структуру. Представлено аналіз літературних джерел щодо структурних перетворень після шліфування та підходи до оцінки структурних змін у поверхневому шарі. Запропоновано структурну схему формування БШ, що відображає основні стадії фазових перетворень під час шліфування.

шліфування, газові підшипники, поверхневий шар, електро-ерозійне алмазне шліфування, білі шари, мартенсит, гарденіт, структурні перетворення

Постановка проблеми. Один із ключових напрямів удосконалення експлуатаційних характеристик деталей машин і механізмів — підвищення їхньої твердості, зносостійкості та довговічності. Зокрема, в обробці поверхонь газових підшипників широко застосовуються різні методи азотування та їхні комбіновані технології. Одним із ефективних підходів є нітрогартування, яке поєднує азотування з подальшим термічним зміцненням, що дозволяє суттєво підвищити твердість і зносостійкість як середньовуглецевих, так і високовуглецевих сталей.

Перспективним методом модифікації структури сталей є внутрішнє азотування, в результаті якого у матриці матеріалу формується дисперсна зона стабільних нітридних частинок. Це забезпечує термічну стабільність та підвищену міцність деталей, зокрема при високотемпературних і динамічних навантаженнях. Крім того, застосування термоактивування та подальшого гартування азотованих поверхонь дозволяє керувати фазовим складом, розподілом концентрації азоту та твердістю азотованого шару, що відкриває можливості для оптимізації технологічних режимів зміцнення.

Важливим аспектом у дослідженні процесів зміцнення є моделювання перерозподілу азоту в оброблюваних поверхнях і визначення залежності енергетичного впливу на формування зміцнювального шару. У випадку газових підшипників, які зазнають інтенсивного абразивного та електро-ерозійного алмазного шліфування, критично важливо встановити закономірності впливу енергетичних параметрів процесу на формування зміцненого шару. Визначення цих закономірностей сприятиме розробленню ефективних технологій підвищення надійності та довговічності підшипникових вузлів, що працюють у складних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання структурних перетворень, що відбуваються в поверхневому шарі металів після шліфування, досі є дискусійним у

науковій літературі. Деякі дослідники [1-5] розглядають ці перетворення не лише як негативне явище (прижоги), а і як можливий спосіб цілеспрямованого формування зміцнених структур.

У роботі авторів [5], досліджується вплив різних параметрів шліфування на формування білих шарів під час обробки загартованої сталі AISI52100. Автори вивчають залежність товщини білих шарів від швидкості колеса, швидкості заготовки, глибини шліфування, зносу колеса та умов охолодження. Результати показують, що товщина білих шарів збільшується з підвищенням глибини шліфування, швидкості колеса та зносу колеса. Водночас, для деталей, що зазнають циклічних навантажень, формування БШ може негативно впливати на довговічність через підвищену крихкість матеріалу.

У роботі [6] досліджується формування білого шару при шліфуванні загартованої сталі SKD-11. Проведено експерименти з різними параметрами обробки для оптимізації умов, що сприяють утворенню сприятливого білого шару, та мінімізації негативних зон термічного впливу. Автор підкреслює необхідність подальших досліджень механізмів утворення таких структур, зокрема у процесі високошвидкісного шліфування. Дослідник у своїй роботі [7] вивчали зміни мікроструктури монокристалічного суперсплаву під час шліфування. Ними встановлено, що збільшення глибини шліфування підвищує силу різання, температуру та товщину білого шару. Виявлено дифузію елементів (Al, Ta) між білим шаром і шаром пластичної деформації. Після обробки підвищується мікротвердість поверхні, а ступінь зміцнення залежить від глибини різання та швидкості подачі.

Науковці у своїй роботі [8] визначають, що білий шар (БШ), що виникає в процесі шліфування, суттєво впливає на експлуатаційні характеристики та довговічність деталей. Для вивчення його фізичних властивостей та встановлення взаємозв'язку між характеристиками білого шару й амплітудою спектра сигналу акустичної емісії (АЕ) проведено експериментальні дослідження шліфування загартованої підшипникової сталі GCr15. Аналізувалися особливості формування білого шару та зміни частотних характеристик сигналу акустичної емісії під впливом механічної екструзії та теплового навантаження під час шліфування.

Результати досліджень показали, що білий шар характеризується високою щільністю мікроструктури, підвищеною корозійною стійкістю та вищою мікротвердістю порівняно з темним шаром та основним матеріалом. Його утворення відбувається під комбінованим впливом температури та пластичної деформації. Якщо температура шліфування не перевищує номінальну температуру фазового переходу матеріалу, білий шар формується переважно внаслідок інтенсивної пластичної деформації. При підвищенні температури вище цієї межі відбувається різке збільшення товщини білого шару.

У процесі шліфування сигнал акустичної емісії формується під впливом механічних екструзійних та теплових напружень: низькочастотна складова сигналу визначається механічною екструзією, тоді як високочастотна — тепловими напруженнями. Коли температура перевищує номінальну температуру фазового переходу, енергія молекул та атомів у матеріалі значно зростає, що спричиняє хаотичні високочастотні коливання та різке збільшення амплітуди відповідних сигналів. Виявлено кореляцію між високочастотною амплітудою сигналу акустичної емісії та товщиною білого шару. Запропоновано метод онлайн-моніторингу товщини білого шару шляхом аналізу змін амплітуди високочастотного сигналу, що дозволяє здійснювати контроль фазових перетворень та формування товстого білого шару на

поверхні та у підповерхневій зоні. Дослідження авторів свідчать, що такий підхід може бути ефективним для деталей пневмо-гідроапаратури та інших компонентів, що працюють у специфічних умовах.

Постановка завдання. Таким чином, сучасні дослідження підтверджують необхідність комплексного підходу до оцінки структурних змін після шліфування. У той час як у певних випадках прижоги можуть бути шкідливими, у контрольованих умовах вони здатні покращувати експлуатаційні характеристики деталей. Це підкреслює актуальність подальших досліджень у цій сфері для розширення можливостей цілеспрямованого формування зміцнених поверхневих шарів газових підшипників, які працюють на великих швидкостях в різних умовах.

Мета дослідження – обґрунтувати та експериментально визначити вплив режимів шліфування на формування якісних показників поверхневих шарів газових підшипників, таких як мікротвердість, шорсткість, залишкові напруження, та встановити зв'язок між технологічними параметрами обробки і довговічністю деталей в умовах експлуатаційних навантажень.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні підходи до шліфування як способу зміцнення поверхні та їхній вплив на мікроструктурні зміни в поверхневому шарі газових підшипників.

2. Дослідити вплив основних режимів шліфування (швидкість круга, подача, глибина різання) на утворення білого шару, мікротвердість, ступінь зміцнення та інші характеристики обробленої поверхні.

3. Встановити закономірності між енергетичними параметрами процесу шліфування та експлуатаційними властивостями газових підшипників (зносостійкість, втомна міцність, контактна міцність).

Виклад основного матеріалу. Метод електро-ерозійного алмазного шліфування (ЕАШ) за своїми термодинамічними характеристиками та впливом на оброблювану поверхню газових підшипників найбільш наближений до імпульсних зміцнювальних технологій. Зокрема, він демонструє подібність до спеціального точіння, механоультразвукової, фрикційно-зміцнювальної, лазерної та електрогідроімпульсної обробки. Ці методи сприяють зміні мікроструктури поверхневого шару (ПШ), що зумовлює формування специфічних структурних модифікацій, які покращують фізико-механічні властивості матеріалу та підвищують експлуатаційну надійність газових підшипників.

Високоінтенсивні термо-деформаційні впливи, що виникають у процесі зміцнювальних методів обробки, сприяють формуванню нанокристалічних структур, відомих як «білий шар» або «гарденіт» у поверхневому шарі (ПШ) сталей різних марок. Такі технологічні підходи значно розширюють можливості традиційних матеріалів, зокрема сталі, шляхом формування унікального комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей.

Формування білого шару (БШ) можливе за різних технологічних режимів, що забезпечують:

- високу інтенсивність енергетичного впливу;
- значне підвищення температури в зоні обробки;
- дію високого тиску;
- імпульсний характер навантаження;
- градієнт концентрації вуглецю між оброблюваним матеріалом і середовищем обробки.

Подібні процеси характерні для методів отримання наноструктурних матеріалів, що базуються на використанні концентрованих потоків енергії (КПЕ). Екстремальні умови обробки за допомогою КПЕ сприяють формуванню в матеріалі термодинамічно нерівноважних структур, які включають комбінацію дисперсних і метастабільних фаз із субструктурною та концентраційною неоднорідністю. Ці процеси супроводжуються появою дефектів кристалічної решітки, мікродеформацій, аморфізації, зміною міжплощинних відстаней, що комплексно впливає на механічні властивості обробленого матеріалу.

Електро механічне зміцнення (ЕМЗ) є сучасним методом підвищення експлуатаційних характеристик металевих деталей шляхом одночасного термічного та механічного впливу на їхній поверхневий шар. Під час цього процесу через контактну зону між інструментом і деталлю проходить електричний струм високої щільності ($108\text{--}109\text{ А/м}^2$) при низькій напрузі ($2\text{--}6\text{ В}$). Це спричиняє інтенсивний нагрів виступаючих мікронерівностей поверхні зі швидкістю до $10^6\text{ }^\circ\text{C/с}$, одночасно з пластичною деформацією та подальшим швидким охолодженням (до $10^5\text{ }^\circ\text{C/с}$) за рахунок теплопровідності вглиб матеріалу [9].

Застосування ЕМЗ дозволяє значно покращити експлуатаційні властивості деталей: підвищити зносостійкість рухомих з'єднань у $2\text{--}6$ разів залежно від умов тертя та зносу, збільшити втомну міцність на $30\text{--}70\%$, а також покращити контактну витривалість. Зокрема, для сталі ШХ15 контактна витривалість після ЕМЗ зростає в $1,8\text{--}2$ рази порівняно з нітроцементацією.

Варто зазначити, що ефективність ЕМЗ залежить від правильного вибору технологічних параметрів процесу, таких як щільність струму, швидкість переміщення інструмента, сила притискання та інші. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти максимального покращення механічних властивостей деталей та продовжити їхній експлуатаційний ресурс.

Одним із недоліків традиційних методів зміцнення є необхідність використання додаткового обладнання для їхньої реалізації. Перспективним напрямком у цій сфері є комбіновані технології, які дозволяють отримувати матеріали з унікальними експлуатаційними характеристиками, зокрема підвищеною термостійкістю та зносостійкістю. Це досягається завдяки контрольованому формуванню специфічних структур, включаючи наномасштабні елементи, що можуть бути ефективними для прецизійних деталей пневмо-гідроапаратури, які працюють у режимі тертя без значних динамічних навантажень.

Метод електро-ерозійного алмазного шліфування (ЕАШ) має значні технологічні переваги над іншими методами зміцнення, оскільки дозволяє поєднувати дві операції на одному верстаті, усуваючи потребу в додатковому обладнанні. Це робить його особливо актуальним у сучасному виробництві, де важливими є оптимізація технологічних процесів та зниження витрат.

Попри значний прогрес у вивченні імпульсних методів обробки [10], багато аспектів їхньої фізичної сутності залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, не повністю розкрито механізми формування зміцнювального ефекту, особливо у випадку механічної імпульсної обробки, що вимагає подальших досліджень та теоретичного обґрунтування.

При застосуванні методів електроіскрового зміцнення, лазерної, електронно-променевої, електро механічної та подібних технологій обробки формуються білі шари (БШ) аустенітно-мартенситного походження. У деяких випадках процес супроводжується дифузійним насиченням поверхневого шару елементами, що містяться в електроліті.

Відомо, що під час певних способів механічної обробки загартованих сталей можуть досягатися температури, здатні викликати структурні та фазові перетворення, зокрема відпуск або вторинне гартування (так звані "прижоги"). Відпуск спричиняє зниження твердості, тоді як вторинне гартування, навпаки, може її підвищувати порівняно зі звичайною загартованою сталлю. Ці локальні зміни часто призводять до погіршення якості деталей. Попри численні дослідження в цій сфері, можливість використання структур вторинного гартування для підвищення довговічності машинних деталей залишається відкритим питанням.

Інтенсифікація фізико-хімічних процесів у зоні обробки, викликана високими температурами, пластичною деформацією та утворенням ювенільної поверхні, може суттєво впливати на якість оброблюваного металу. Незважаючи на короткочасність цих явищ, підвищення вільної енергії кристалічної решітки металу та зниження енергії активації можуть сприяти взаємодії мастильно-охолоджувальних або інших середовищ з металом деталі та інструменту [11-13]. Це відкриває можливість цілеспрямованого керування якістю та експлуатаційними характеристиками оброблюваних виробів.

Структури з підвищеною твердістю та специфічними властивостями можуть виникати не лише в процесі механічної чи іншої обробки загартованих сталей, а й у певних експлуатаційних умовах. Однак їхня природа, а також особливості виникнення і впливу на довговічність деталей, залишаються недостатньо вивченими.

На сьогоднішній день відсутній єдиний підхід до визначення структурних змін, що відбуваються в процесі шліфування під впливом теплових, деформаційних та інших супутніх факторів. Існує точка зору, згідно з якою будь-які структурні зміни, що виникають у процесі шліфування, розглядаються як прижоги. Цей процес характеризується значним тепловим навантаженням, що призводить до суттєвих змін фізико-механічного стану поверхневого шару, зокрема до утворення шліфувальних прижогів і мікротріщин. Такі дефекти значно знижують експлуатаційну надійність і довговічність машинних деталей [14].

Традиційно прижоги вважаються браком обробки, оскільки необхідні фізико-механічні характеристики деталі забезпечуються попередніми операціями, такими як термічна обробка. Якщо після шліфування спостерігається зниження твердості, то прижог відпуску оцінюється як негативне явище. Однак прижоги гартування не завжди можна однозначно вважати дефектом, оскільки існують технологічні процеси, спеціально спрямовані на формування вдруге загартованих структур. Такі структури демонструють підвищену твердість, зносостійкість і корозійну стійкість. При цьому якість вдруге загартованих структур може суттєво відрізнятися. До найбільш якісних структур належать білі шари (БШ), що формуються в результаті цілеспрямованого та керованого технологічного впливу [15-17].

Дослідження показали, що ЕАШ ефективно працює в різних мастильно-охолоджувальних середовищах, включаючи водні розчини, наприклад 1,5-2% водний розчин Na_2CO_3 , що подається в зону обробки поливом. Це сприяє стабільному перебігу процесу шліфування.

Порівняльний аналіз традиційного алмазного шліфування (АШ) та ЕАШ, показав, що продуктивність ЕАШ перевищує продуктивність АШ у 3-5 разів. Це пояснюється тим, що під час ЕАШ ріжуча здатність алмазного круга оновлюється завдяки електроенергії, що подається в зону різання. Завдяки цьому забезпечується висока ефективність обробки. Натомість при звичайному АШ алмазні зерна поступово руйнуються, що призводить до зниження їх виступу над поверхнею зв'язки через 5-15 хвилин роботи. Для виявлення оптимальних режимів шліфування для заготовок із різним хімічним складом сталей необхідно розробити технологічні параметри, що не

лише вирішують завдання різання, але й забезпечують високі експлуатаційні властивості оброблених матеріалів. Особливо важливим це є при використанні електро-алмазного шліфування (ЕАШ) [18].

При ЕАШ можна спрямовано регулювати параметри стану поверхневого шару (показники якості поверхні). Зміна режимів електро-алмазної обробки дозволяє інтенсифікувати процес знімання металу, враховуючи тенденції зміни структурного та напруженого стану обробленої поверхні. Процес ЕАШ пропонується використовувати як зміцнювальний метод.

Змінений поверхневий шар (ПШ) сталевих заготовок газових підшипників характеризується структурними та фізико-механічними відмінностями від основної частини матеріалу. Глибина ПШ при шліфуванні залежить від теплофізичних властивостей сталі, параметрів обробки, таких як механічні та електричні умови, а також характеристик алмазного круга [19].

Експлуатаційні властивості газових підшипників визначаються станом ПШ, що залежить від технології їх виготовлення [20-23]. Шліфування суттєво змінює фізико-механічний стан поверхневого шару, і цей процес має важливе значення для властивостей матеріалу. Відомо, що структура матеріалу визначає його властивості, тому структурно-фазовий стан ПШ сталевих заготовок є важливим індикатором якості поверхні, поряд з іншими фізико-механічними та геометричними параметрами.

До ключових експлуатаційних властивостей, які залежать від якості поверхневого шару, можна віднести зносостійкість, втомну міцність та інші характеристики. Таким чином, стан поверхні має великий вплив на експлуатаційні властивості газових підшипників. Однак, на даний момент не існує єдиного підходу до впливу режимів електро-алмазного шліфування (ЕАШ) як зміцнювального методу на основні параметри якості ПШ, що може створювати труднощі в забезпеченні необхідної працездатності виробів після шліфування.

Аналіз технологічних процесів фінішної обробки газових підшипників показує, що ключову роль відіграє шліфування. У загальній структурі обладнання 98% припадає на металорізальні верстати, з яких 20% використовуються для абразивної обробки.

Дослідження свідчать, що комбінування різних технологічних методів обробки, зокрема оптимізація режимів шліфування, сприяє покращенню експлуатаційних характеристик поверхневих шарів, що безпосередньо впливає на довговічність підшипників.

Досягнення високої точності та якості поверхневого шару вимагає вдосконалення технологічних процесів, спрямованого на покращення мікроструктури матеріалу, зниження рівня дефектів і залишкових напружень. Одним з ефективних методів є введення проміжної операції шліфування перед термічною обробкою, що дозволяє підвищити втомну міцність, забезпечити рівномірність структури та зменшити негативний вплив температурних навантажень на твердість матеріалу.

Таким чином, оптимізація режимів шліфування є критично важливою для формування якісного поверхневого шару газових підшипників, що безпосередньо визначає їхні експлуатаційні характеристики (рис. 1).

На кожному етапі технологічного процесу обробки газових підшипників заготовка піддається енергетичному впливу, що безпосередньо впливає на формоутворення і характеристики поверхневого шару. Питома поверхнева енергія грає важливу роль у визначенні властивостей обробленої поверхні. Тому, зменшення енергії, що поглинається одиницею площі, призводить до зменшення глибини зміцненого шару, що може негативно позначитися на експлуатаційних властивостях підшипників.

Ефективний технологічний процес обробки газових підшипників складається з послідовних операцій, кожна з яких взаємопов'язана і сприяє досягненню кінцевого результату. Важливим аспектом є досягнення оптимального балансу між параметрами продуктивності і якістю обробленої поверхні. Це протиріччя, яке виникає під час обробки, вимагає точного налаштування режимів шліфування для забезпечення максимальної ефективності при збереженні необхідних експлуатаційних властивостей, таких як зносостійкість, контактна міцність та корозійна стійкість (рис. 1)

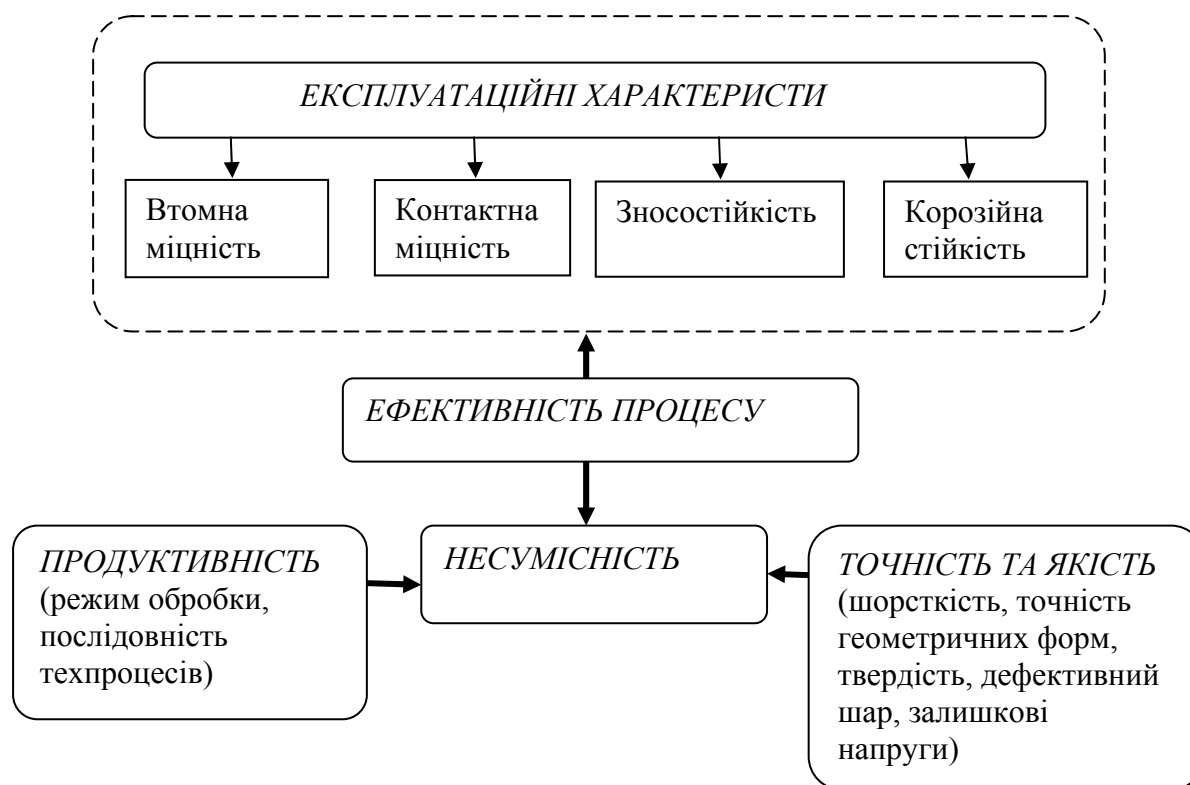


Рисунок 1 – Схема ефективного технологічного процесу обробки поверхонь газових підшипників
Джерело: розроблено авторами

Ефективність процесу шліфування залежить від правильного вибору режимів обробки, які забезпечують необхідну якість поверхневого шару. До основних технологічних параметрів шліфування відносять:

1. Швидкість обертання шліфувального круга (V_s) – впливає на температуру в зоні різання, інтенсивність термомеханічної дії та утворення білого шару.
2. Швидкість подачі заготовки (V_w) – визначає час контакту між кругом і поверхнею деталі, а також ступінь термічного навантаження.
3. Глибина різання (a_p) – безпосередньо пов'язана з утворенням дефектного шару, залишкових напружень та мікротріщин при надмірному значенні.
4. Подача шліфування (f_n) – величина переміщення круга за один оберт заготовки; впливає на шорсткість поверхні.
5. Тип абразиву – використовується переважно електро-алмазний інструмент, що забезпечує високу точність і зниження термічного навантаження.
6. Характеристика шліфувального круга (зернистість: 100–160 мкм, твердість: середня або м'яка (залежно від типу сталі), зв'язка: металева або гальмова).

7. Охолодження – використовується емульсійна або мінеральна охолоджувальна рідина, що значно знижує температуру в зоні шліфування та запобігає утворенню прижогів.

8. Кількість проходів – як правило, 2–3 чорнові та 1–2 чистових проходи.

9. Температура в зоні шліфування – критичний параметр, що впливає на утворення білого шару: оптимальний діапазон: 100–450 °С, критичний рівень для прижогів: понад 550 °С.

Параметри технологічного процесу шліфування поверхні газових підшипників наведені в таблиці 1 та варіюються залежно від типу матеріалу підшипника (наприклад, 20X13, 18X2H4BA, GCr15), його попередньої обробки (азотування, гартування), вимог до якості поверхні та умов експлуатації (високі швидкості обертання, температурні навантаження тощо).

Таблиця 1 – Основні параметри технологічного процесу шліфування поверхні газових підшипників

№	Технологічний параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Рекомендовані межі
1.	Швидкість обертання шліфувального круга	V_o	м/с	25–50
2.	Швидкість подачі заготовки	V_w	мм/хв	5–15
3.	Глибина шліфування	a_p	мм	0,01–0,05
4.	Подача шліфування	f_n	мм/об	0,001–0,015
5.	Швидкість знімання шару	Q_w	мм ³ /с	10–100
6.	Застосування охолодження	-	-	емульсійна або мінеральна рідина
7.	Тип абразиву	-	-	електро-алмазний інструмент
8.	Мікротвердість поверхневого шару	HV	HV	750–1100
9.	Шорсткість поверхні	Ra	мкм	0,05–0,2
10.	Товщина білого шару	t_{ws}	мкм	2–10
11.	Залишкові напруги	σ_{rec}	МПа	-200...-800

Джерело: розроблено авторами

При розробці структури технологічного процесу обробки деталей газових підшипників важливо визначити оптимальне місце розташування операцій термічного, хіміко-термічного або іншого виду зміцнювального впливу. Це обумовлено тим, що заготовка на всіх етапах перетворення у готову деталь зазнає комплексного енергетичного навантаження, яке включає як температурні, так і механічні (силові) фактори.

У цьому контексті ефективність технологічного процесу необхідно оцінювати не лише за кінцевими геометричними параметрами, а й за якістю сформованого поверхневого шару, мікроструктурними характеристиками та ступенем зміцнення матеріалу. Зокрема, одним із ключових аспектів є контроль температурно-силового

впливу в зоні обробки, який безпосередньо впливає на формування білого шару — зміцненої зони, що утворюється внаслідок інтенсивної пластичної деформації та локального нагріву.

Одним із найбільш чутливих параметрів, що визначає інтенсивність утворення білого шару, є глибина шліфування. Зі зростанням цього параметра збільшується енергія, що передається в поверхневий шар, що, у свою чергу, змінює товщину сформованої структури. Для ілюстрації цієї залежності доцільно побудувати графік, який відображає вплив глибини шліфування на товщину білого шару (рис. 2).

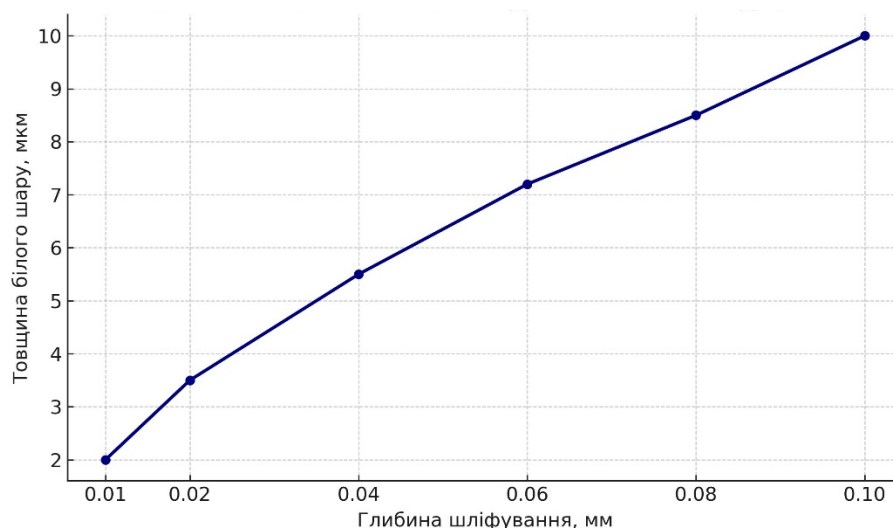


Рисунок 2 — Залежність товщини білого шару від глибини шліфування

Джерело: розроблено авторами

Такий графік дозволяє виявити оптимальний діапазон параметрів обробки, за якого досягається зміцнення без перенасичення та структурної деградації матеріалу.

Висновки. Вивчення взаємозв'язку між режимами шліфування, якістю поверхні та експлуатаційними властивостями є важливим не тільки для наукового аналізу, але й для практичного застосування, особливо в контексті газових підшипників. Це питання необхідно розглядати з урахуванням особливостей обладнання, марки сталі, використовуюваного алмазного інструменту, а також вимог до якості поверхневого шару металу, що застосовується в умовах конкретного виробництва та експлуатації підшипників.

1. Проведений аналіз літератури та експериментальних даних підтверджує, що шліфування є не лише операцією фінішної обробки, але й ефективним способом локального зміцнення поверхневого шару газових підшипників. Формування білого шару та зміна мікроструктури відбувається під впливом температурних і деформаційних факторів, що можуть бути використані цілеспрямовано для покращення експлуатаційних властивостей.

2. Встановлено, що глибина різання суттєво впливає на формування білого шару: при збільшенні глибини з 10 до 100 мкм спостерігається зростання товщини білого шару з 2 до 20 мкм. Це супроводжується також зростанням мікротвердості, однак перевищення оптимального діапазону (40–50 мкм) призводить до появи зон перенасичення і мікротріщин, що негативно впливають на ресурс підшипників.

3. Отримані результати демонструють, що оптимальні режими шліфування забезпечують формування білого шару товщиною до 10 мкм, що корелює зі зростанням мікротвердості до 1200–1300 HV у поверхневому шарі, при збереженні низького рівня залишкових напружень. Виявлено закономірності між питомою поверхневою енергією

процесу шліфування та експлуатаційними характеристиками газових підшипників. Зокрема, при питомій енергії до 18–22 Дж/мм² спостерігається найкраще співвідношення між зносостійкістю, втомною міцністю та контактною твердістю. Перевищення цього діапазону знижує стабільність поверхневого шару через надмірне теплове навантаження. Розроблено графік залежності товщини білого шару від глибини шліфування, який дозволяє оцінювати якість обробки та формувати рекомендації щодо режимів для забезпечення надійної структури поверхні.

Отримані результати можуть бути використані для розробки адаптивних технологічних процесів обробки, в яких контроль товщини білого шару здійснюється через моніторинг енергетичних параметрів або акустичної емісії, що актуально для прецизійних вузлів пневмо- і гідросистем.

Список літератури

1. Dudnikov, A., Dudnik, V., Ivankova, O., Burlaka, O. Substantiation of parameters for the technological process of restoring machine parts by the method of plastic deformation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 1(1). С. 75–80. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156779>.
2. Духота О. І., Науменко Н. О., Богач Л. В. Зносостійкість композиційних газотермічних покриттів за умов фретинг-корозійного зношування. Матеріали для роботи в екстремальних умовах : матеріали V Міжнар. наук. конф. (Київ, 2015). Київ : НТУУ «КПІ», 2015. С. 148–150.
3. Корнієнко А. О., Яхья М. С., Іщук Н. В. та ін. Формування покриттів триботехнічного призначення комбінованою лазернохіміко-термічною обробкою. Проблеми тертя та зношування. 2008. № 49(2). С. 61–65.
4. Диха О. В., Сорокати́й Р. В., Пасонський С. Ф., Диха М. О. Дискретне зміщення та зносостійкість циліндричних трибосистем ковзання : монографія. Хмельницький : ХНУ, 2016. 240 с.
5. Huang, X., Zhou, Z., Ren, Y., Mao, C., Li, W. Experimental research material characteristics effect on white layers formation in grinding of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. № 66. С. 1555. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4439-y>.
6. Wei Ming, W., An Qing Long, Chen, M. Study on the Effect of Grinding Parameters to the White Layer Formation in Grinding SKD-11 Hardened Steel. *Scientific.net*. 2013. № 53–54. С. 279–284. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.53-54.279>.
7. Xu, Y., Gong, Y., Tian, J., Zhang, W. Formation of White Layer on the Grinding Surface of Ni-Based Single Crystal Superalloy. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*. 2024. № 45(9). С. 1301–1308. DOI: <https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2024.09.011>.
8. Mao, C., Sun, P., Tang, W., Zhang, M., Luo, Y., Hu, Y., Zhang, D., Tang, K., Guan, F. Features of Grinding White Layer and Its Correlation with Acoustic Emission Signal. *Journal of Mechanical Engineering*. 2023. № 59(9). С. 349–359. DOI: <https://doi.org/10.3901/JME.2023.09.349>.
9. Посонський С. Ф. Аналіз досліджень дискретного зміщення і підвищення зносостійкості поверхонь трибоелементів. Проблеми трибології. 2010. № 3. С. 138–141.
10. Жартовський О. В., Кравченко В. І., Ларічкін О. В., Карягін Ж. Г. Автоматизована система виміру та розрахунку параметрів імпульсного електричного струму. Технічні науки та технології. 2018. № 2(12). С. 167–175. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-167-175](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-167-175).
11. Гурей І. В., Гурей В. І., Дмитренко П. Р. Вплив нанокристалічного зміцненого поверхневого шару на зносостійкість сірого чавуну при терті з граничним мащенням. Сучасні технології в машинобудуванні. 2014. № 9. С. 23–32.
12. Гурей І. В., Пашечко М. І. Зносостійкість сталі та чавуну при реверсивному терті після фрикційного зміцнення. Проблеми трибології. 1999. № 1. С. 52–55.
13. Гурей І., Пасечник А. Підвищення втомної міцності деталей машин фрикційним зміцненням. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2000. № 5(2). С. 39–43.
14. Підгаєцький М. М., Скібінський О. І., Козинець Д. Б. Умови швидкісного шліфування поверхонь деталей із загартованої сталі 18ХГТ. eaKirNTU. 2008. URL: <http://eaKirNTU> (дата звернення: 18.05.2025).
15. Sheng, Y., Hua, Y., Wang, X., Zhao, X., Chen, L., Zhou, H., Wang, J., Berndt, C. C., Li, W. Application of High-Density Electropulsing to Improve the Performance of Metallic Materials: Mechanisms, Microstructure and Properties. *Materials (Basel)*. 2018. № 11(2). С. 185. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11020185>.

16. Shaburova, N., Krymsky, V., Moghaddam, A. O. Theory and Practice of Using Pulsed Electromagnetic Processing of Metal Melts. *Materials* (Basel). 2022. № 15(3). С. 1235. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15031235>.
17. Li, X., Guan, Y. Theoretical fundamentals of short pulse laser–metal interaction: A review. *Nanotechnol. Precis. Eng.* 2020. № 3. С. 105–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.08.001>.
18. Lu, Y., Luo, W., Wu, X., Zhou, C., Xu, B., Zhao, H., Li, L. Efficient and Precise Grinding of Sapphire Glass Based on Dry Electrical Discharge Dressed Coarse Diamond Grinding Wheel. *Micromachines* (Basel). 2019. № 10(9). С. 625. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi10090625>.
19. Фесенко А. Г. та ін. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин : навч. посібник. Дніпро : РВВ ДНУ, 2015. 312 с.
20. Віштак І. В. Покращення характеристик шпиндельного вузла за рахунок оптимізації геометричних параметрів пневматичної опори : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02. Хмельницький, 2015. 156 с.
21. Віштак І. В., Кобилянський С. О. Актуальність розробки високошвидкісних шпиндельних вузлів для підвищення якості продукції. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. № 1. С. 17–21.
22. Li, J., Wu, J., Fan, J., Wang, X., Gao, Z. Research on dynamic characteristics and structural optimization of porous gas bearings in linear compressors. *Sci Rep.* 2023. № 13. С. 16507. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43818-z>.
23. Li, Y., Li, R., Ye, Y., Li, X., Chen, Y. Numerical analysis on the performance characteristics of a new gas journal bearing by using finite difference method. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. № 13(6). DOI: <https://doi.org/10.1177/16878140211028056>.

References

1. Dudnikov, A., Dudnik, V., Ivankova, O., & Burlaka, O. (2019). Substantiation of parameters for the technological process of restoring machine parts by the method of plastic deformation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(1), 75–80. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156779>
2. Dukhota, O. I., Naumenko, N. O., & Bohach, L. V. (2015). Znosostyikist kompozytsiinykh hazotermichnykh pokryttiv za umov fretynh-koroziinoho znoshuvannia. In *Materialy dlia roboty v ekstremalnykh umovakh: Materialy V Mizhnarodnoi naukovi konferentsii* (pp. 148–150). NTUU "KPI".
3. Korniienko, A. O., Yakhia, M. S., Ishchuk, N. V., et al. (2008). Formuvannia pokryttiv trybotekhnichnoho pryznachennia kombinovanoi lazernokhimiko-termichnoiu obrobkoiu. *Problemy tertia ta znoshuvannia*, 49(2), 61–65.
4. Dykha, O. V., Sorokatii, R. V., Pasonskyi, S. F., & Dykha, M. O. (2016). Dyskretne zmishchennia ta znossostyikist tsylindrychnykh trybosystem kovzannia. *Khmelnyskyi: KhNU*.
5. Huang, X., Zhou, Z., Ren, Y., Mao, C., & Li, W. (2013). Experimental research material characteristics effect on white layers formation in grinding of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, 1555. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4439-y>
6. Wei, M. W., An, Q. L., & Chen, M. (2013). Study on the effect of grinding parameters to the white layer formation in grinding SKD-11 hardened steel. *Scientific.net*, 53-54, 279–284. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.53-54.279>
7. Xu, Y., Gong, Y., Tian, J., & Zhang, W. (2024). Formation of white layer on the grinding surface of Ni-based single crystal superalloy. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 45(9), 1301–1308. <https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2024.09.011>
8. Mao, C., Sun, P., Tang, W., Zhang, M., Luo, Y., Hu, Y., Zhang, D., Tang, K., & Guan, F. (2023). Features of grinding white layer and its correlation with acoustic emission signal. *Journal of Mechanical Engineering*, 59(9), 349–359. <https://doi.org/10.3901/JME.2023.09.349>
9. Posonskyi, S. F. (2010). Analiz doslidzhen dyskretnoho zmitsnennia i pidvyshchennia znossostyikosti poverkhni tryboelementiv. *Problemy trybolohii*, 3, 138–141.
10. Zhartovskyi, O. V., Kravchenko, V. I., Larychkin, O. V., & Kariahin, Zh. H. (2018). Avtomatyzovana systema vymiru ta rozrakhunku parametriv impulsnoho elektrychnoho strumu. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 2(12), 167–175. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-167-175](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-167-175)
11. Hurei, I. V., Hurei, V. I., & Dmytrenko, P. R. (2014). Vplyv nanokryystalichnoho zmitsnenoho poverkhnevoho sharu na znossostyikist siroho chavyunu pry certi z hramychnym mashchennia. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni*, 9, 23–32.
12. Hurei, I. V., & Pashechko, M. I. (1999). Znosostyikist stali ta chavyunu pry revercynomu tertii pislia fryktsiinoho zmitsnennia. *Problemy trybolohii*, 1, 52–55.
13. Hurei, I., & Pasechnyk, A. (2000). Pidvyshchennia vtomnoi mitsnosti detalei mashyn fryktsiinoho zmitsnennia. *Visnyk Ternopilskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu*, 5(2), 39–43.

14. Pidhaietskyi, M. M., Skibinskyi, O. I., & Kozynets, D. B. (2008). Umovy shvydkisnogo shlifuannia poverkhn detalei iz zahartovanoi stali 18KhGT. *eaKirNTU*.
15. Sheng, Y., Hua, Y., Wang, X., Zhao, X., Chen, L., Zhou, H., Wang, J., Berndt, C. C., & Li, W. (2018). Application of high-density electropulsing to improve the performance of metallic materials: Mechanisms, microstructure and properties. *Materials (Basel)*, 11(2), 185. <https://doi.org/10.3390/ma11020185>
16. Shaburova, N., Krymsky, V., & Moghaddam, A. O. (2022). Theory and practice of using pulsed electromagnetic processing of metal melts. *Materials (Basel)*, 15(3), 1235. <https://doi.org/10.3390/ma15031235>
17. Li, X., & Guan, Y. (2020). Theoretical fundamentals of short pulse laser–metal interaction: A review. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 3, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.08.001>
18. Lu, Y., Luo, W., Wu, X., Zhou, C., Xu, B., Zhao, H., & Li, L. (2019). Efficient and precise grinding of sapphire glass based on dry electrical discharge dressed coarse diamond grinding wheel. *Micromachines (Basel)*, 10(9), 625. <https://doi.org/10.3390/mi10090625>
19. Fesenko, A. H., et al. (2015). *Metody poverkhnevoho zmitsnennia u protsesi vyhotovlennia detalei mashyn*. Dnipro: RVV DNU.
20. Vishtak, I. V. (2015). *Pokrashchennia kharakterystyk shpyndelnogo vuzla za rakhunok optymizatsii heometrychnykh parametriv pnevmatychnoi opory* (Disertatsiia, NTU).
21. Vishtak, I. V., & Kobylanskyi, Y. O. (2016). Aktualnist rozrobky vysokoshvydkisnykh shpyndelnykh vuzliv dlia pidvyshchennia yakosti produktsii. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 1, 17–21.
22. Li, J., Wu, J., Fan, J., Wang, X., & Gao, Z. (2023). Research on dynamic characteristics and structural optimization of porous gas bearings in linear compressors. *Scientific Reports*, 13, 16507. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43818-z>
23. Li, Y., Li, R., Ye, Y., Li, X., & Chen, Y. (2021). Numerical analysis on the performance characteristics of a new gas journal bearing by using finite difference method. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(6). <https://doi.org/10.1177/16878140211028056>

Inna Vishtak, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Andrii Melchenko**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

The Influence of Grinding Modes on the Main Quality Parameters of Surface Layers of Gas Bearings and their Operational Properties

The article examines the impact of grinding modes on the quality of gas bearing surface layers and their performance properties. It emphasizes the importance of surface integrity in gas bearings, highlighting how grinding parameters affect key attributes such as microhardness, wear resistance, fatigue strength, and contact strength. Special attention is given to nitriding and nitrohardening technologies, which significantly improve steel hardness and wear resistance.

The article also discusses electrical erosion diamond grinding, a precise technique for finishing hard-to-machine materials. This method, with its thermodynamic characteristics, provides a solution for controlling surface layer modifications and fine-tuning material properties to ensure the desired quality of bearing surfaces.

A particular focus is placed on the formation of white layers during grinding, which consist of austenitic-martensitic structures. These layers are known for their high microhardness and distinct properties compared to the base material. The article explores how grinding parameters, such as wheel speed, feed rate, and depth of cut, influence the formation of these layers. It also addresses how temperature and mechanical stresses during grinding contribute to the development of surface layers that enhance wear resistance but may also cause residual stresses that affect fatigue life.

The article proposes a structural diagram to illustrate the stages of phase transformations during grinding, highlighting the interplay between thermal, mechanical, and material factors. This model helps predict and control structural changes in gas bearing surface layers, optimizing their performance properties.

In conclusion, the article stresses the importance of optimizing grinding modes to improve the quality of surface layers, enhancing the performance of gas bearings. It calls for further research into the thermodynamic and mechanical aspects of grinding, particularly regarding phase transformations and the formation of surface structures that contribute to the durability and reliability of gas bearings. Optimizing grinding parameters and incorporating advanced hardening technologies will improve bearing performance and longevity, ensuring their effectiveness in demanding applications.

grinding, gas bearings, surface layer, electrical erosion diamond grinding, white layers, martensite, hardenite, structural transformations

Одержано (Received) 01.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 02.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 13.05.2025

УДК 621.82

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.99-108](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.99-108)

І. Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, **А. Є. Дячун**, доц., канд. техн. наук,
Т. С. Дубиняк, доц., канд. техн. наук, **О. Ю. Стібайло**, **Р. З. Золотий**, доц., канд. техн. наук
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: geckoivan1@ukr.net

Дослідження операцій технологічного процесу виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків

Представлено дослідження та практична реалізація основних операцій технологічного процесу виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків, що включають проточування та заточування зовнішньої крайки спіралі шнека, розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека для отримання заготовок під ножі-подрібнювачі, їх загинання. Для виконання перерахованих операцій проведено проектування та виготовлення спеціального технологічного оснащення та інструментів. Для затиску, базування та оброблення спіралі шнека розроблено та виготовлено спеціальну оправку, спеціальний інструмент для заточування крайки шнека та ролик для загинання ножів подрібнювачів. Проведено експериментальні дослідження для визначення закономірностей взаємозв'язку конструктивних параметрів ножів подрібнювачів шнека, зокрема кута загинання сектора шнека, кутового значення сегмента, товщини матеріалу шнека із силою загинання сегмента шнека. Проведено статистичне оброблення даних результатів експериментальних досліджень з одержанням рівнянь регресії у кодованих та натуральних величинах залежності сили загинання сегмента шнека від його конструктивних незалежних змінних параметрів а також перевірку адекватності одержаних рівнянь за допомогою прикладного програмного забезпечення.

ножі-подрібнювачі, спіраль шнека, гвинтовий робочий орган, спосіб, технологія, технологічний процес, експериментальні дослідження

Постановка проблеми. У різних галузях промисловості, таких, як будівельна, харчова, переробна, гірничо-видобувна та сільського господарства знайшли застосування гвинтові робочі органи із ножами-подрібнювачами та лопатевими елементами. Перевагами таких шнеків є поєднання переміщення сільськогосподарських та інших матеріалів із різними технологічними операціями їх перероблення, зокрема подрібнення, змішування [1-4]. Досить широко використовуються такі шнеки при виробництві матеріалів, комбікормів та інших кормів сільськогосподарського призначення для годівлі тварин та птиці [1-4] при змішуванні сипких матеріалів та подрібненні коренеплодів. Тому технологічне забезпечення виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків в умовах середньосерійного виробництва є важливим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проектуванню та дослідженню окремих операцій технологічних процесів виготовлення шнеків різними методами із проектуванням інструментів та оснащення присвячені праці багатьох авторів [5-20]. Їхні дослідження пов'язані із розробленням технологічних процесів виготовлення стандартних і спеціальних шнеків, зокрема гофрованих, стрічкових, лопатевих, Г- і П-подібних, оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами різних конфігурацій і типів, з пружними та еластичними елементами тощо [5-14]. При підготовці виробництва таких шнеків значну увагу приділено оптимізації технологічних параметрів, режимів оброблення, проектуванню устаткування, оснащення та інструментів для пластичного формоутворення та механічного оброблення [5, 6, 8-12, 16-20].

Складність технологічного процесу виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків пов'язана із особливостями їхньої конструкції та порівняно малою жорсткістю, що вимагає проектування спеціального технологічного оснащення. Розроблені технології виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків представлено у роботах [6, 8, 9]. При цьому ножі-подрібнювачі на шнеках формуються із застосуванням ручних інструментів [6, 8] та способів механізації. Технології включають неповне розрізання на визначену глибину зовнішньої крайки попередньо навитого шнека, загинання окремих секцій під ножі-подрібнювачі з використанням оправки та обертових матриць і пуансонів [9]. Розглянуті технологічні процеси не забезпечують однаковий кут нахилу при згині ножів-подрібнювачів, тому потребують вдосконалення.

Метою роботи є експериментальні дослідження та практична реалізація операцій технологічного процесу виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків.

Виклад основного матеріалу. Детально технологічний процес виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків представлено у роботі [21]. Серед основних операцій вказаного технологічного процесу, що досліджено експериментальним методом, є проточування та заточування зовнішньої крайки спіралі шнека, розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека для отримання заготовок під ножі-подрібнювачі, їх загинання. Для виконання перерахованих операцій проведено проектування та виготовлення спеціального технологічного оснащення та інструментів. Для затиску та базування спіралі шнека розроблено та виготовлено спеціальну оправку, що представлена на рис. 1.

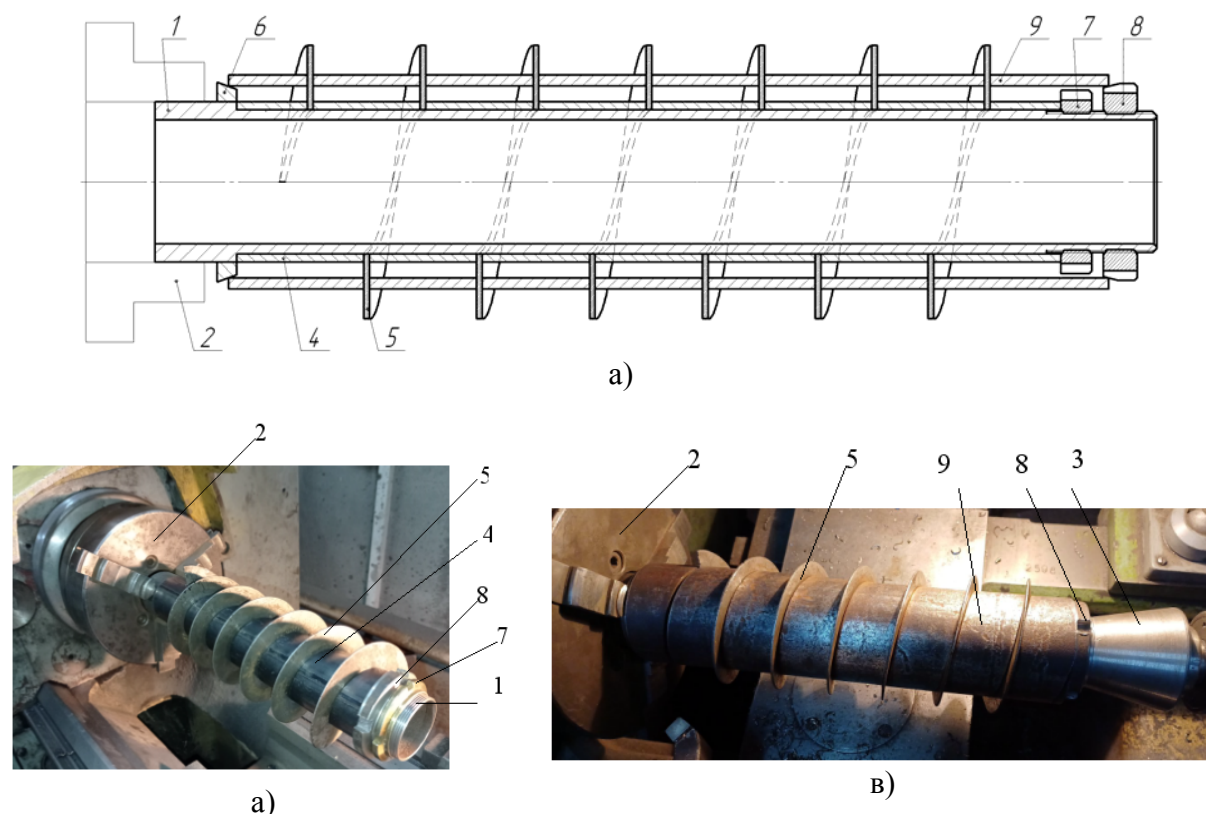


Рисунок 1 – Оправка для затиску та базування спіралі шнека а) креслення перерізу оправки; б) оправка без зовнішньої гвинтової труби; в) оправка із зовнішньою гвинтовою трубою

Джерело: розроблено авторами

Оправка (рис. 1) складається із труби 1, яку закріплюють в патроні 2 токарного верстата та базують в центрі 3 задньої бабки токарного верстата. На трубі 1 встановлено внутрішню гвинтову трубу 4, із гвинтовою канавкою, що за напрямком і кроком відповідає спіралі шнека 5. Також на трубі 1 встановлено конус 6 та загвинчено дві гайки 7 та 8 із різними зовнішніми діаметрами. На конусі 6 та на конусній поверхні гайки 8 встановлено зовнішню гвинтову трубу 9, із гвинтовою канавкою, що за напрямком і кроком відповідає спіралі шнека 5. Встановлення спіралі шнека на оправку виконується шляхом її загвинчування у гвинтову канавку труби 4 та затиску за допомогою гайки 7. Для підвищення жорсткості витків спіралі шнека 5 та виконання операції загинання заготовок під ножі-подрібнювачі на шнек 5 загвинчують зовнішню гвинтову трубу 9 по гвинтовій канавці, яку закріплюють за допомогою гайки 8 з упором у конус 6.

Для виготовлення внутрішньої та зовнішньої гвинтових труб оправки рис. 1 використано процес вирізання гвинтової канавки лазером на верстаті з ЧПК. Процес вирізання гвинтової канавки лазером показано на рис. 2.

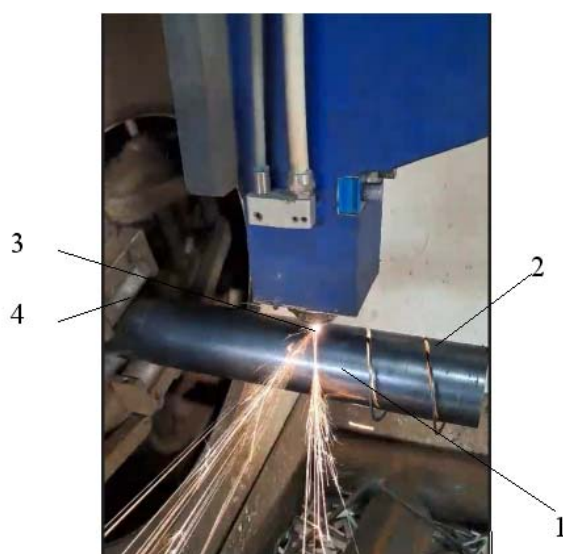


Рисунок 2 – Процес нарізання гвинтової канавки при виготовленні гвинтових труб для оправки:

1 – труба; 2 – гвинтова канавка; 3 – лазер; 4 – патрон верстата

Джерело: розроблено авторами

Проточування та заточування зовнішньої крайки спіралі шнека виконували на токарно-гвинторізному верстаті. Процес проточування зовнішньої крайки спіралі шнека 1, що закріплений на оправці 2 та у патроні 3 токарного верстата прохідним різцем 4 показано на рис. 3. Проточування виконувалось для усунення радіального биття та відхилення від концентричності зовнішньої крайки шнека відносно внутрішньої крайки. В процесі експериментальних досліджень проточування виконувалось двох видів: 1) із подачею від 0,1 до 0,2 мм/об та виникненням ударних навантажень на різець та 2) із подачею, що дорівнювала кроку витків шнека - 40 мм/об із перекриттям ріжучою кромкою різця усієї товщини витка шнека. В обох випадках спостерігалось утворення заусенців довжиною до 2 мм та товщиною до 0,5 мм на зовнішній крайці шнека.

Процес заточування зовнішньої крайки спіралі шнека (рис. 4) виконували з метою зняття заусенців а також для формування загостреної клиноподібної частини ножів-подрібнювачів. Для виконання цього процесу розроблено спеціальний інструмент, що зображений на рис. 5.

Інструмент для заточування крайки шнека (рис. 5) виконаний у вигляді корпусу 1, двох точильних елементів у вигляді дисків 2, що виготовленні із швидкоріжучої сталі

Р6М5, ручки 3, прямої державки 4 та пружини 5.

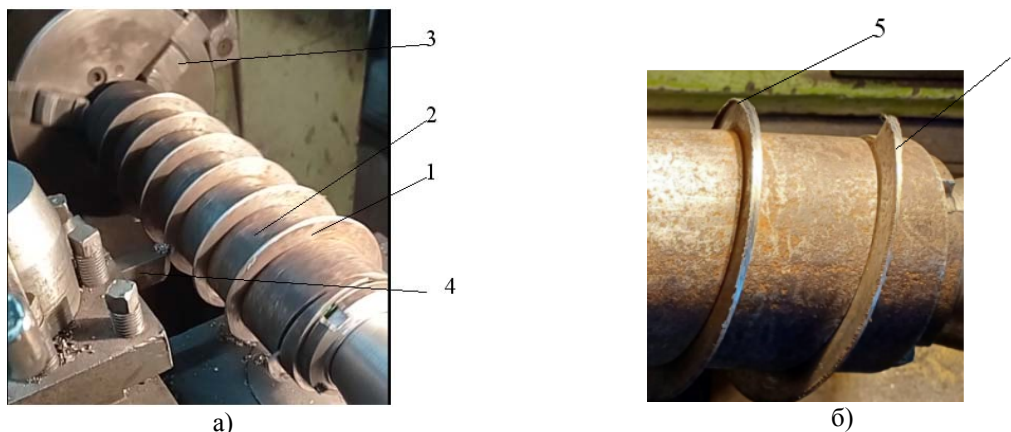


Рисунок 3 – Процес проточування зовнішньої крайки спіралі шнека а) із сформованим заусенцем на крайці б): 1 – спіраль шнека; 2 – оправка; 3 – патрон верстата; 4 – прохідний різець; 5 – заусенець на зовнішній крайці шнека

Джерело: розроблено авторами

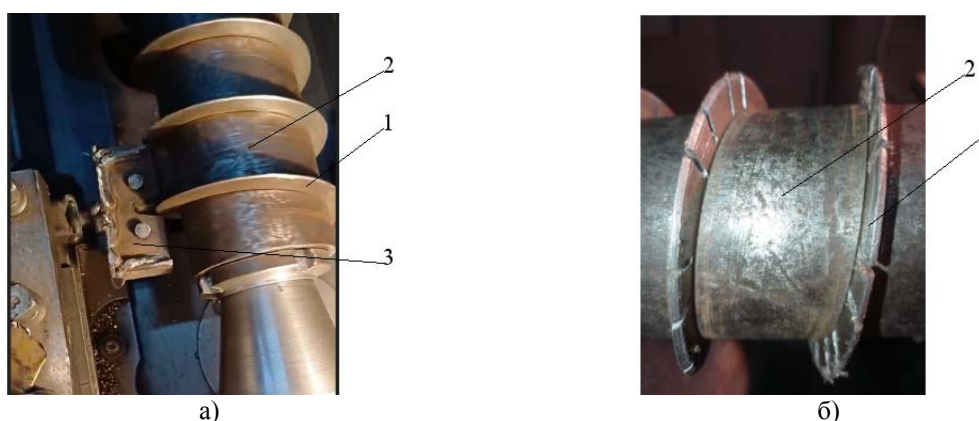


Рисунок 4 – Процес заточування зовнішньої крайки спіралі шнека а) із сформованим клином на крайці б): 1 – спіраль шнека; 2 – оправка; 3 – інструмент для заточування

Джерело: розроблено авторами

Диски 2 розміщені в паралельних площинах з перекриттям один до одного і також можуть виготовлятися із твердих сплавів. Корпус 1 закріплено до ручки 3. Середня частина ручки 3 виконана квадратною, а права та ліва бокові частина ручки 3 - круглими. Ручка 3 з можливістю осьового зміщення встановлена в направляючій державці 4. Перевагою такого інструменту є можливість адаптації при значних відхиленнях кромки шнека за кроком та діаметром за рахунок радіального зміщення ріжучих кромek дисків 2 інструмента при виникненні значних сил різання.

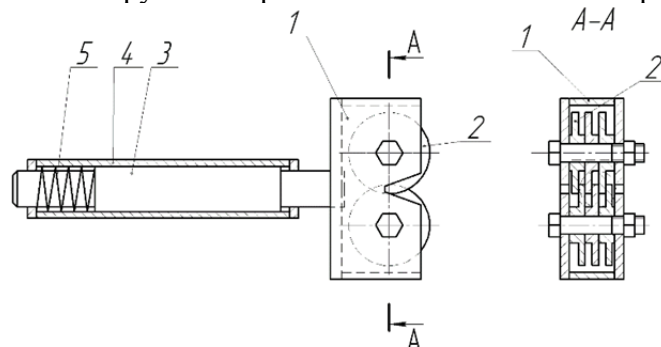


Рисунок 5 – Інструмент для заточування крайки шнека

Джерело: розроблено авторами

В процесі заточування зовнішньої крайки спіралі шнека досліджували вплив параметрів процесу різання на головну складову сили різання.

Наступною розглянуто операцію розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека для отримання заготовок під ножі-подрібнювачі, що зображено на рис. 6. Операцію із її дослідженням виконували на фрезерному верстаті з ЧПК. Розрізання виконували дисковою фрезою 5. Оправку із спіраллю шнека 1 закріплювали у патроні 2 ділильної головки 3 та у центрі 4.



Рисунок 6 – Процес розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека: 1 – оправка із спіраллю шнека; 2 – патрон; 3 – ділильна головка; 4 – центр; 5 – дискова фреза

Джерело: розроблено авторами

Дослідження операції загинання заготовок під ножі-подрібнювачі виконувалось на токарно-гвинторізному верстаті із використанням додаткового устаткування, що зображено на рис. 7, 8, 9.

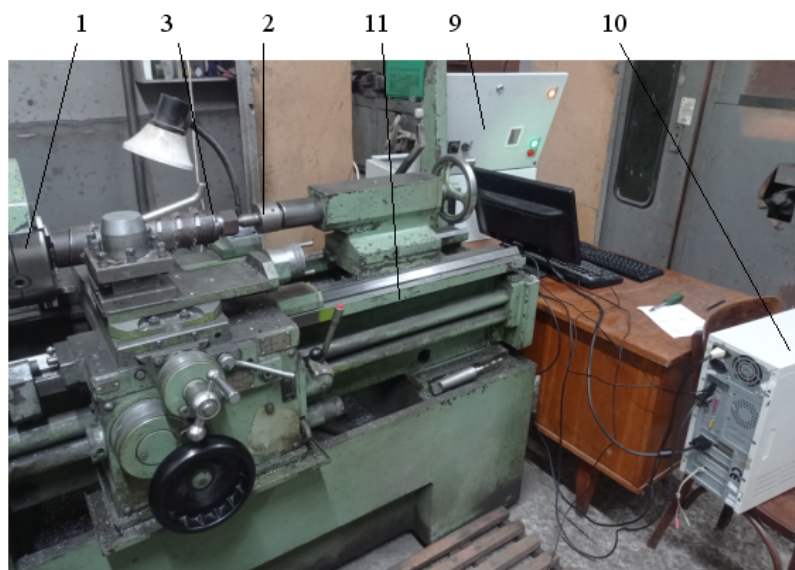


Рисунок 7 – Устаткування для дослідження операції загинання сегментів шнека під ножі-подрібнювачі
Джерело: розроблено авторами

У патроні 1 та у центрі 2 токарно-гвинторізного верстата 11 встановлювали оправку 3 із спіраллю шнека 4, на якому попередньо прорізані пази з формуванням сегментів 5 висотою 10 мм та шириною із трьох кутових значень 20° , 25° , 30° . Всього на одному витку сформовано дев'ять сегментів – по три сегменти на кожне кутове значення. Загинання сегментів на три різні кути виконувалось роликом 6, що на підшипнику кочення закріплено на державці 7 у різцетримачі 8 верстата.

До електродвигуна приводу подач верстата під'єднано перетворювач (Altivar 71) 9 частоти струму, що подається із мережі до електродвигуна. Керування та програмування роботи перетворювача частоти струму, а відповідно і електродвигуном приводу подач верстата виконується за допомогою ПК 10 з програмним забезпеченням PowerSuite. Застосування частотного перетворювача 9 дозволяє змінювати частоту обертання вала електродвигуна приводу подач верстата у широкому діапазоні, а відповідно і швидкість загинання сегментів під ножі-подрібнювачі, що забезпечує виконання досліджень відповідно до розробленої методики проведення експериментів. В результаті одержували інформацію у вигляді чисельних даних, представлених графіками, зміни потужності, що витрачається для загинання сегментів шнека, та крутних моментів на валі електродвигуна. На основі кінематичної схеми механізму подач верстата та даних про крутний момент на валі електродвигуна визначали силу загинання сегмента шнека під ножі-подрібнювачі.

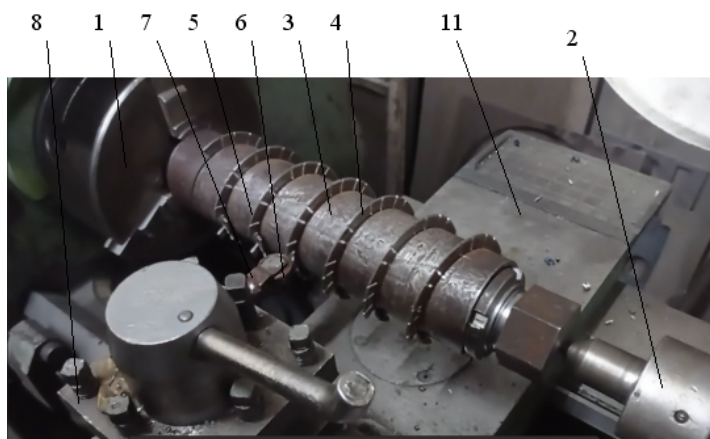


Рисунок 8 – Процес загинання сегментів шнека під ножі-подрібнювачі

Джерело: розроблено авторами

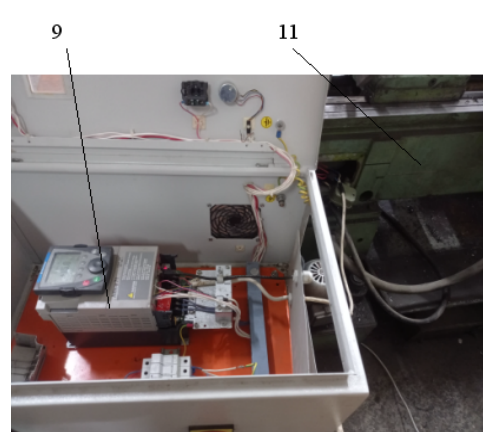


Рисунок 9 – Під'єднання перетворювач частоти струму (Altivar 71) до електродвигуна приводу подач верстата

Джерело: розроблено авторами

Фрагмент результатів збору та оброблення даних з частотного перетворювача Altivar 71 програмним забезпеченням PowerSuite із побудовою графіків зміни у часі потужності та крутного моменту приводу на роторі двигуна представлено на рисунку 10.

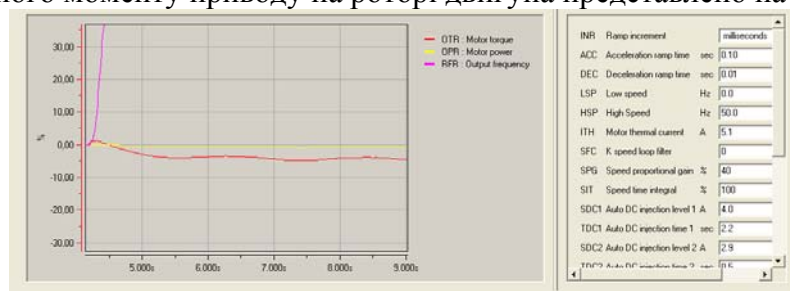


Рисунок 10 – Фрагмент результатів збору та оброблення даних за частотного перетворювача Altivar 71 програмним забезпеченням PowerSuite

Джерело: розроблено авторами

На основі вибору змінних вхідних факторів, рівнів їх варіювання та теоретичних розрахунків одержано таблицю 1 при дослідженні сили загинання сегмента шнека на основі повнофакторного експерименту.

Таблиця 1 - Результати кодування факторів та рівні їх варіювання при дослідженні сили загинання сегмента шнека

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур.(кодовані)		
	натур.	код.				
Кут загинання сектора	β , град	x_1	20	80 (+1)	60 (0)	40 (-1)
Кутове значення сектора сегмента	α , град	x_2	5	30 (+1)	25 (0)	20 (-1)
Товщина матеріалу шнека	s , мм	x_3	0,2	2,2 (+1)	2,0 (0)	1,8 (-1)

Джерело: розроблено авторами

Загальний вигляд рівняння регресії сили загинання сегмента шнека за результатами проведених експериментів у кодованих та натуральних величинах має вигляд відповідно:

$$P_{(x_1, x_2, x_3)} = 866 + 104,6x_1 + 179,5x_2 + 202,2x_3 + 21x_1x_2 + 23,75x_1x_3 + 40,75x_2x_3 + 23,12x_1^2 + 0,63x_2^2 + 15,12x_3^2, \quad (1)$$

$$P_{(\beta, \alpha, s)} = 2433,53 - 18,83\beta - 59,46\alpha - 1876s + 0,21\beta\alpha + 5,94\beta s + 40,75\alpha s + 0,058\beta^2 + 0,025\alpha^2 + 378s^2. \quad (2)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (2), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності сили загинання сегмента шнека, що представлено на рис. 11 та 12.

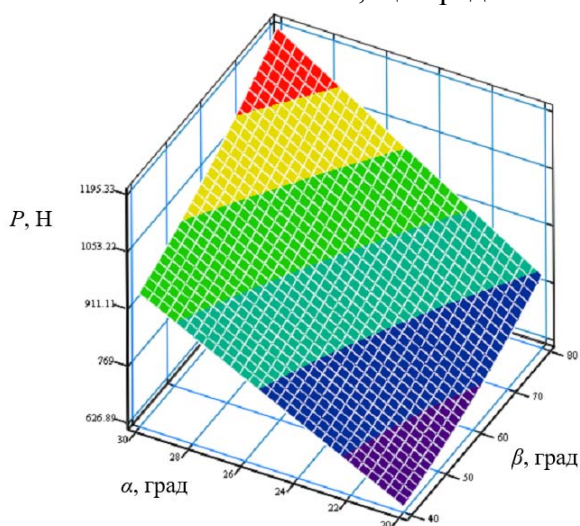


Рисунок 11 - Поверхня відгуку залежності сили загинання сегмента шнека від кута загинання сектора шнека β та кутового значення сектора сегмента α ($s=2$ мм)

Джерело: розроблено авторами

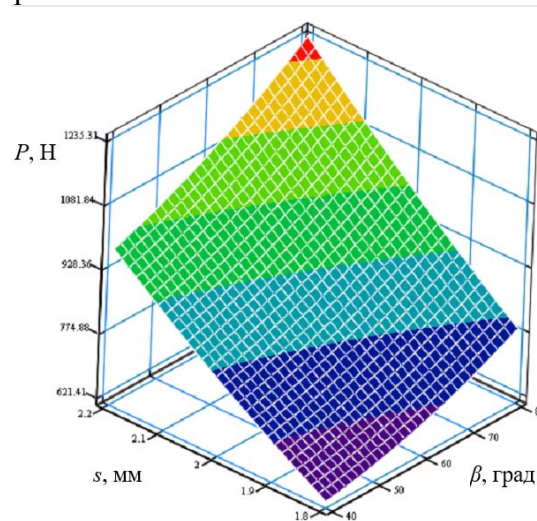


Рисунок 12 - Поверхня відгуку залежності сили загинання сегмента шнека від кута загинання сектора шнека β та товщини матеріалу шнека s ($\alpha=25$ град)

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи рівняння регресії (1), встановлено, що основним фактором, який впливає на силу загинання сегмента шнека є фактор $x_3(s)$. Менший вплив має фактор $x_2(\alpha)$ і найменший - фактор $x_1(\beta)$. Зростання усіх факторів призводить до збільшення сили загинання сегмента шнека.

З рисунків 11, 12 та рівняння регресії (2) зроблено висновки, що максимальне значення сили загинання сегмента шнека дорівнювало 1484 Н, а мінімальне – 496 Н. Збільшення кута загинання сектора шнека β від 40 град до 80 град призводить до зростання сили загинання сегмента шнека в 1,26 рази. При цьому збільшення кутового значення сектора сегмента α від 20 град до 30 град призводить до зростання сили загинання сегмента шнека в 1,5 рази, а зміна товщини матеріалу шнека від 1,8 мм до 2,2 мм призводить до зростання сили загинання сегмента шнека в 1,58 рази.

Висновки:

1. Представлено дослідження та практична реалізація основних операцій технологічного процесу виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків, що включають проточування та заточування зовнішньої крайки спіралі шнека, розрізання зовнішньої крайки спіралі шнека для отримання заготовок під ножі-подрібнювачі, їх загинання. Для виконання перерахованих операцій проведено проектування та виготовлення спеціального технологічного оснащення та інструментів.

2. Представлено результати експериментальних досліджень для визначення закономірностей взаємозв'язку конструктивних параметрів ножів подрібнювачів шнека, зокрема кута загинання сектора шнека, кутового значення сектора сегмента, товщини матеріалу шнека із силою загинання сегмента шнека. Проведено статистичне оброблення даних результатів експериментальних досліджень з одержанням рівнянь регресії у кодованих та натуральних величинах залежності сили загинання сегмента шнека від його конструктивних незалежних змінних параметрів а також перевірку адекватності одержаних рівнянь за допомогою прикладного програмного забезпечення.

3. Встановлено, що максимальне значення сили загинання сегмента шнека дорівнювало 1484 Н, а мінімальне – 496 Н. Збільшення кута загинання сектора шнека β від 40 град до 80 град призводить до зростання сили загинання сегмента шнека в 1,26 рази. При цьому збільшення кутового значення сектора сегмента α від 20 град до 30 град призводить до зростання сили загинання сегмента шнека в 1,5 рази, а зміна товщини матеріалу шнека від 1,8 мм до 2,2 мм призводить до зростання сили загинання сегмента шнека в 1,58 рази.

Список літератури

1. Hrytsai Yu. IN. Justification of the parameters of the combined screw conveyor-shredder of root crops: thesis ... technical college Sciences: special 05.05.11. Ternopil, 2020. 137 p.
2. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В. Моделювання роботи малогабаритного лопатево-гвинтового змішувача. Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Вип. 6. Луцьк, 2000. С. 129-135.
3. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В., Гудь В.З., Дмитрів О.Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами-змішувачами. Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Випуск 45. Луцьк, 2020. С. 84-93.
4. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів: монографія. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
5. Гевко Б.М., Ляшук О.Л., Гевко І.Б., Драган А.П., Новосад І.Я. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей, Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. 367 с.
6. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Дячун А.Є., Гупка А.Б., Третьяков О.Л. Технологічне проектування та виготовлення гвинтових транспортно-технологічних робочих органів. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2025. 457 с.
7. Ivan Hevko, Andriy Pik, Roman Komar, Oleh Stibaylo, Serhiy Koval' Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies : Scientific Journal of TNTU. Ternopil.: TNTU, 2024. Vol 113. No 1. P. 5–15.
8. Гевко І.Б., Лещук Р.Я., Брикса А.О., Стібайло О.Ю., Коваль С.О. Особливості конструкцій і технологічного проектування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39). Част.2. С. 24-34.

9. Стібайло О.Ю. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових елементів сільськогосподарської техніки. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41). Ч.2. С. 55-64.
10. Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л., Пилипець О. М. Передумови розроблення комбінованих операцій виготовлення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском. *Перспективні технології та прилади*. 2021. Вип. 18. С. 112–123.
11. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
12. Васильків В. В. Л. Д. Радик, І. Б. Гевко Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату : Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»): «Наукові нотатки»; ЛДТУ. 2004. Вип. 14. С. 12–18.
13. Hevko. I.B., Dyachun A.Ye., Lyashuk O.L., Martsenko S.V., Gypka A.B. Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Polytechnic University of Bucharest, 2016, - Vol. 49, № 2, p.77-82.
14. Rogatinskiy R., Hevko I., Gypka A., Garmatyk O., Martsenko S. Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. *Acta Technologica Agriculturae. Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae*. 2017. No. 2. P. 36–41. doi.org/10.1515/ata-2017-0007
15. Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning // [Ivan Hevko, Andrii Diachun, Oleg Lyashuk, Yuriy Vovk, Andriy Hupka] – *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering*, P. 385-394.
16. Hevko. I.B., Dyachun A.Ye., Hud V.Z., Rohatynska L.R., Klendiy V.M. Investigation of the stability of the torsorial vibrations of a screw conveyer under the influence of pulse forces. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Polytechnic University of Bucharest, 2015, Vol. 45, № 1, p.77-86.
17. Гевко І. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. *Вісник ТНТУ, Тернопіль*, 2011, Том 16. № 1, с.69-77.
18. Гурик О.Я. Гевко І.Б., Драган А.П. До питання моделювання геометрії робочих органів гвинтових змішувачів. *Вісник ТДТУ, Тернопіль*, 2002, Том 7 , № 4, с. 54-60.
19. Feng Guang- liang, Bai Yin-shan. Some moulding ways of spiral vane. *Coal Mine Machinery*. 2006 Vol. 27 No. 9, p. 835-849.
20. Li Zheng Feng, Li Qiang Jiang. Design of combined helical blade manufacturing device. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 753–755. P. 1386–1390. Crossref. Doi: 10.4028/www.scientific.net/amr 753-755.1386. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR>
21. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Дубиняк Т. С., Стібайло О. Ю., Гупка А. Б. Технологічні особливості виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42). Ч. 1. С. 75-83.

References

1. Hrytsai Yu. IN. Justification of the parameters of the combined screw conveyor-shredder of root crops: thesis ... technical college Sciences: special 05.05.11. Ternopil, 2020. 137 p. [in Ukrainian].
2. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Dmytriv, D. V. (2000). Modeliuvannia roboty malohabarytnoho lopatevohvyntovoho zmishuvacha. *Silskohospodarski mashyny: zb. nauk. statei.*–Lutsk, 129-135. [in Ukrainian]
3. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., Dmytriv, D. V., Hud, V. Z., & Dmytriv, O. R. (2020). Modeliuvannia zmishuvannia komponentiv hvyntovymy konveieramy-zmishuvachamy. *Silskohospodarski mashyny*, (45), 84-93. [in Ukrainian].
4. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Diachun, A. I. (2014). Naukovo-prikladni osnovi stvorennia gvintovikh transportno-tehnologichnikh mekhanizmiv [Scientific and applied foundations of the creation of screw transport and technological mechanisms]. Ternopil: TNTU imeni Ivana Pulyuya.[in Ukrainian].
5. Hevko, B. M., Liashuk, O. L., Hevko, I. B., Drahan, A. P., & Novosad, I. Ya. (2008). Tekhnologichni osnovy formoutvorennia spetsialnykh profilnykh hvyntovykh detalei. Ternopil: SMP “Taip. [in Ukrainian].
6. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Diachun, A. Ye., Hupka, A. B., & Tretiakov, O. L. (2025). Tekhnologichne proiektuvannia ta vyhotovlennia hvyntovykh transportno-tehnologichnykh robochykh orhaniv. *FOP Palianytsia V. A.* [in Ukrainian].
7. Hevko, I., Pik, A., Komar, R., Stibaylo, O., & Koval, S. (2024). Peculiarities of technological design of Ushaped screw transport and technological working bodies. *Scientific Journal of TNTU*, 113(1), 5–15.
8. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Bryksa, A. O., Stibailo, O. Yu., & Koval, S. O. (2023). Osoblyvosti konstruktsii i tekhnologichnoho proiektuvannia robochykh orhaniv lopatevykh hvyntovykh zmishuvachiv. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39, chast. 2), 24–34. [in Ukrainian]
9. Stibailo, O. Yu. (2024). Tekhnologichni ta konstruktyvni osoblyvosti vyhotovlennia hvyntovykh elementiv silskohospodarskoi tekhniky. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 10(41, chast. 2), 55–64 [in Ukrainian].

10. Pylypets, M. I., Vasylykiv, V. V., Radyk, D. L., & Pylypets, O. M. (2021). Peredumovy rozroblennia kombinovanykh operatsii vyhotovlennia hvyntovykh i shnekovykh zahotovok metodom obrobky metaliv tyskom. Perspektivni tekhnologii ta prylady, 18, 112–123. [in Ukrainian].
11. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Hud, V. Z., Dmytriv, O. R., Dubyniak, T. S., Navrotska, T. D., & Kruhlyk, O. A. (2019). Hnuchki hvyntovi konveiry: proektuvannia, tekhnologii vyhotovlennia, eksperymentalni doslidzhennia. FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
12. Vasylykiv, V. V., Radyk, L. D., & Hevko, I. B. (2004). Tekhnologichni ta konstruktyvni osoblyvosti vyhotovlennia hvyntovykh zahotovok z lystovoho prokatu. Naukovi notatky LDTU, 14, 12–18. [in Ukrainian].
13. Hevko, I. B., Dyachun, A. Ye., Lyashuk, O. L., Martsenko, S. V., & Gypka, A. B. (2016). Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. INMATEH - Agricultural Engineering, 49(2), 77–82 [in English].
14. Rogatynskiy, R., Hevko, I., Gypka, A., Garmatyk, O., & Martsenko, S. (2017). Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. Acta Technologica Agriculturae, 2, 36–41. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0007> [in English].
15. Hevko, I., Diachun, A., Lyashuk, O., Vovk, Y., & Hupka, A. (2021). Study of dynamic and power parameters of the screw workpieces with a curved profile turning. In Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV: Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021 (Vol. 1, pp. 385–394) [in English].
16. Hevko, I. B., Dyachun, A. Ye., Hud, V. Z., Rohatynska, L. R., & Klendiy, V. M. (2015). Investigation of the stability of the torsional vibrations of a screw conveyor under the influence of pulse forces. INMATEH - Agricultural Engineering, 45(1), 77–86. [in English].
17. Hevko, I. (2011). Modeliuvannia kharakteru navantazhennia na hvyntovi robochi orhany. Visnyk TNTU, 16(1), 69–77. [in Ukrainian].
18. Huryk, O. Ya., Hevko, I. B., & Drahan, A. P. (2002). Do pyttannia modeliuvannia heometrii robochykh orhaniv hvyntovykh zmishuvachiv. Visnyk TDTU, 7(4), 54–60. [in Ukrainian].
19. Feng, G.-L., & Bai, Y.-S. (2006). Some moulding ways of spiral vane. Coal Mine Machinery, 27(9), 835–849.
20. Li, Z. F., & Li, Q. J. (2013). Design of combined helical blade manufacturing device. Advanced Materials Research, 753–755, 1386–1390. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR753-755.1386>.
21. Hevko I. B., Diachun A. Ye., Dubyniak T. S., Stibailo O. Yu., & Hupka A. B. (2025). Tekhnologichni osoblyvosti vyhotovlennia nozhiv-podribniuvachiv na spiraliakh shnekiv. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, 11(42, chast. 1), 75–83. [in Ukrainian].

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Andrii Diachun**, Assoc. Prof., PhD, **Taras Dubyniak**, Assoc. Prof., PhD, **Oleg Stibailo**, **Roman Zolotyi**, Assoc. Prof., PhD

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Research of Technological Process Operations for Manufacturing Shredder Knives on Screw Spirals

Screw working bodies with shredder knives and blade elements have been used in various industries, such as construction, food and processing, mining and agriculture. The advantages of such screws are the combination of the movement of agricultural and other materials with various technological operations of their processing, in particular, crushing and mixing. Such augers are widely used in the production of materials, compound feeds and other agricultural feeds for feeding animals and poultry, when mixing loose materials and grinding root crops. Therefore, technological support for the manufacture of shredder knives on screw spirals in medium-volume production is an important task. The purpose of the work is experimental research and practical implementation of the operations of the technological process of manufacturing shredder knives on screw spirals.

The research and practical implementation of the main operations of the technological process of manufacturing shredder knives on screw spirals are presented, including grinding and sharpening the outer edge of the screw spiral, cutting the outer edge of the screw spiral to obtain blanks for shredder knives, and bending them. To perform the above operations, special technological equipment and tools were designed and manufactured. A special mandrel was designed and manufactured for clamping, basing and machining the screw spiral, a special tool for sharpening the screw edge and a roller for bending the knives of the shredders. Experimental studies were conducted to determine the patterns of the relationship between the design parameters of the knives of screw crushers, in particular the angle of bending of the screw sector, the angular value of the segment sector, the thickness of the screw material with the bending force of the screw segment. Statistical processing of experimental research results was carried out to obtain regression equations in coded and natural values of the dependence of the bending force of the screw segment on its constructive independent variable parameters, as well as checking the adequacy of the obtained equations using application software. The maximum value of the bending force of the screw segment was 1484 N, and the minimum was 496 N. An increase in the bending angle of the screw sector from 40 degrees to 80 degrees leads to an increase in the bending force of the screw segment by 1.26 times.

chopper knives, auger spiral, screw working body, method, technology, technological process, experimental research

Одержано (Received) 09.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 15.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

УДК 621.82

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.109-116](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.109-116)**І. Б. Гевко**, проф., д-р техн. наук, **Р. М. Рогатинський**, проф., д-р техн. наук,**Р. В. Комар**, доц., канд. техн. наук, **І. Г. Ткаченко**, доц., канд. техн. наук,**А. Б. Гупка**, доц., канд. техн. наук*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: geckoivan1@ukr.net*

Технологічне проектування способів виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб

В роботі обґрунтовано чотири нові способи виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб з використання оправок і формувальних роликів. Розроблені способи можуть реалізовуватися різними шляхами. Зокрема вминанням U-подібних рифів на готовій трубі, або одночасним навиванням та U-подібним вминанням стрічки прямокутного січення на оправу з U-подібним спіральним виступом, з подальшим скріпленням виступів навитої стрічки зварним швом. Загалом розроблені способи виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб можна умовно поділити на два типи - із можливістю зміни висоти U-подібного рифу за рахунок зміни діаметр прутка пружини, та без такої можливості, в яких використовуються оправки з незмінною висотою U-подібного рифу. Також в роботі визначено і охарактеризовано конструкційні матеріалами для виготовлення гвинтових транспортних труб. У якості вихідних заготовок доцільно використовувати труби безшовні холодно- і гарачекатані, труби литі, смуговий холоднокатаний прокат. Для обох типів способів визначено і представлено раціональні конструктивно-технологічні параметри їхньої реалізації.

U-подібна, гвинтова поверхня, заготовка, спосіб, транспортна труба, формувальний ролик, операція, спіральний виступ.

Постановка проблеми. Процес технологічного проектування і виготовлення спеціальних гвинтових заготовок супроводжується низкою технічних і виробничих проблем, що потребують системного аналізу та комплексного вирішення. Однією з основних проблем є складність забезпечення високої точності геометричних параметрів гвинтових поверхонь, особливо в умовах одиничного чи дрібносерійного виробництва. Такі поверхні мають складну просторову форму, що потребує використання спеціалізованого інструменту, високоточного оснащення та сучасних методів контролю. Ще одним важливим викликом є вибір оптимального методу формування заготовки залежно від матеріалу, конструктивних вимог і умов експлуатації. При цьому необхідно враховувати не лише технічні характеристики, але й економічну доцільність виробництва, витрати на оснастку та енергоємність процесу. Проблематичним також є досягнення необхідних механічних властивостей виробу (міцність, зносостійкість, втомна витривалість), що часто вимагає впровадження додаткових технологічних операцій, зокрема термічної обробки або поверхневого зміцнення. Усі ці чинники ускладнюють технологічне планування, підвищують ризики дефектів і збільшують собівартість продукції. Таким чином, основна проблема полягає у розробці раціональних та технічно ефективних технологічних способів, які здатні забезпечити виготовлення спеціальних гвинтових заготовок з необхідними характеристиками при мінімальних виробничих витратах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічні аспекти проектування та дослідження процесів виготовлення аналогів спеціальних гвинтових заготовок висвітлено у працях провідних учених, зокрема Б.М. Гевка [1, 2], М.І. Пилипця [3-5], В.В. Васильківа [5-7], Р.М. Рогатинського [8-11], А.Є. Дячуна [11-16], а також в інших авторитетних джерелах як українського, так і міжнародного походження [17-19]. У цих роботах висвітлено широкий спектр підходів до отримання спеціальних гвинтових

заготовок, зокрема методи навивання, прокатування, штампування, пресування тощо, кожен з яких має свої переваги й обмеження залежно від типу матеріалу, геометрії спіралі та умов експлуатації виробу. Окрему увагу приділено підвищенню технологічності конструкцій спеціальної оснастки, зокрема шляхом удосконалення конструктивних рішень, зменшення енергоспоживання і витрат матеріалів у процесі виготовлення, а також розробленню спеціалізованого технологічного інструментарію. Останні дослідження у сфері технологічного проєктування та виготовлення спеціальних гвинтових заготовок охоплюють широкий спектр інноваційних підходів, спрямованих на підвищення ефективності виробництва, зниження енергоспоживання та покращення якості продукції. Зокрема були запропоновані такі підходи як багаторівнева класифікація конструкцій гвинтових і шнекових заготовок; морфологічний аналіз для синтезу нових способів навивання гвинтових заготовок; оптимізація технологічних процесів виготовлення гвинтових заготовок, зокрема, шляхом уніфікації конструкцій та впровадження сучасних методів проєктування.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення способів і технологічних процесів виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб.

Виклад основного матеріалу. У сучасному машинобудуванні технологічне проєктування процесу виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб передбачає аналіз умов експлуатації виробу, вибір оптимального матеріалу, визначення послідовності операцій обробки, а також забезпечення необхідного рівня якості й економічної доцільності. Саме правильне технологічне проєктування дозволяє знизити виробничі витрати, скоротити час обробки та підвищити конкурентоспроможність продукції. У цьому контексті актуальність теми обумовлена постійним ускладненням конструкцій виробів, зростанням вимог до точності й довговічності деталей, а також потребою в оптимізації технологічних процесів. Відповідно виготовлення гвинтових транспортних труб реалізується різними способами, представленими нижче.

На рис. 1 представлено конструктивну схему способу виготовлення гвинтових транспортних труб [20]. На першій операції трубу 1, на якій виконують U-подібні вминання 2, закріплюють на оправі 3 відомим способом. Зовнішня поверхня оправы 3 виконана із жорсткої гуми 4. На трубу 1 встановлюють пружину 5. Потім оправу 3 з трубою 1 і пружиною 5 закріплюють в привідній опорі 6 та в обертовому центрі 7 і здійснюють деформування з U-подібними вминаннями 2 на трубі 1 шляхом притискання формувального вала 8.

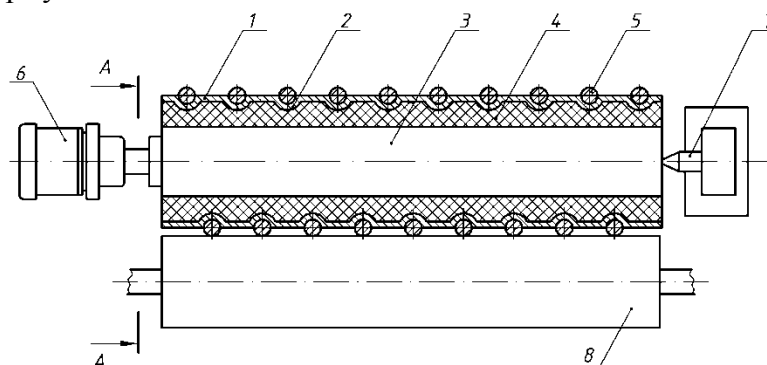


Рисунок 1 - Конструктивна схема способу виготовлення гвинтових транспортних труб
Джерело: розроблено авторами

На другій операції виконується навивання на трубі 1 U-подібних вминань 2 шляхом різностороннього обертання розміщеної в оправі 3 привідну опору 6 та

обертовий центр 7 з трубою 1 та пружиною 5, та притиснутим до них формувальним валом 8.

Один з наступних способів виготовлення гвинтових транспортних труб [21] (рис. 2) процес передбачає, що спочатку у гвинтовий паз 1 оправи 2 стандартним способом встановлюють спіральну пружину 3. Далі на оправу 2 разом із пружиною 3 насаджують трубну заготовку 4 і фіксують її також відомим методом. Після цього оправу 2 з установленими пружиною 3 та заготовкою 4 закріплюють у привідній опорі 5 та в обертовому центрі 6.

На другому етапі здійснюється притискання формувального ролика 7, що має U-подібну впадину 8, до поверхні трубної заготовки 4, це забезпечує щільне прилягання заготовки до оправи 2 та спіральної пружини 3 у зоні контакту. Потім у дію приводять привідну опору 5, що обертає оправу 2 разом зі спіральною пружиною 3, трубною заготовкою 4 і обертовим центром 6. Одночасно формувальний ролик 7 з виїмкою 8 здійснює обертально-поступальний рух уздовж осі оправи 2 під кутом, що відповідає кроку спіральної пружини 3. Така траєкторія з можливістю обертання і осевого переміщення ролика дозволяє формувати на трубній заготовці 4 спіральний виступ 9 U-подібної форми.

На третьому етапі оправу 2 разом зі спіральною пружиною 3 та трубною заготовкою 4 знімають із привідної опори 5 та обертового центра 6. Після цього здійснюють зняття трубної заготовки 4, на поверхні якої сформовані U-подібні спіральні виступи 9, з оправи 2 та спіральної пружини 3.

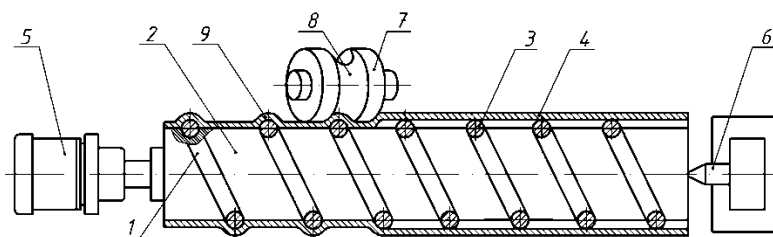


Рисунок 3 - Конструктивна схема способу виготовлення гвинтової поверхні транспортної труби
Джерело: розроблено авторами

Рациональні конструктивно-технологічні параметри способів виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб, які представлено на рис. 1 і рис. 2, відображено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Рациональні конструктивно-технологічні параметри способу виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб

№	Діаметр прутка пружини, мм	Крок пружини, мм	Зовнішній діаметр трубної заготовки, мм	Товщина трубної заготовки, мм	Висота U-подібних вминань, мм
1	≥ 50	10...150	80...300	0,8...2,5	1...50
2	≥ 70	10...180	150...500	0,8...3,0	1...70
3	≥ 100	10...220	200...1000	0,8...3,0	1...100

Джерело: розроблено авторами

Описані методи формування U-подібних гвинтових поверхонь на транспортних трубах дозволяють регулювати висоту U-подібного виступу шляхом зміни діаметра дроту спіральної пружини (див. табл. 1). Нижче наведено варіанти виготовлення трубних гвинтових заготовок із використанням оправ, що забезпечують постійну висоту U-подібного виступу. Один із таких методів виготовлення U-подібних

гвинтових поверхонь труб [23] (рис. 3) полягає в наступному: на першому етапі на оправу 1, яка вже має сформований U-подібний спіральний виступ 2, закріплюють трубну заготовку 3 за допомогою гвинтів 4. Після цього оправу 1 разом із виступом 2 та заготовкою 3 фіксують у привідній опорі 5 та в центрі 6.

На другому етапі виконується притискання формувального ролика 7 з U-подібною виїмкою 8 до поверхні трубної заготовки 3, в результаті чого по всій її довжині формується U-подібний спіральний виступ 9. Цей виступ створюється шляхом вминання матеріалу заготовки під дією ролика 7, виїмка якого за формою точно відповідає профілю U-подібного спірального виступу 2 на оправі 1. Для забезпечення точності процесу ролик 7 розташовується під кутом, що узгоджений із кроком спірального виступу 2 оправы 1. Довжина трубної заготовки 3 при цьому повинна відповідати довжині оправы 1 з нанесеним на ній виступом 2.

На третьому етапі оправу 1 разом із трубною заготовкою 3 знімають із привідної опори 5 та центра 6. Після цього викручують гвинти 4, якими була закріплена заготовка, і виконують зняття трубної заготовки 3 із сформованими на ній U-подібними спіральними виступами 9 шляхом її обережного скручування з U-подібного спірального виступу 2 оправы 1.

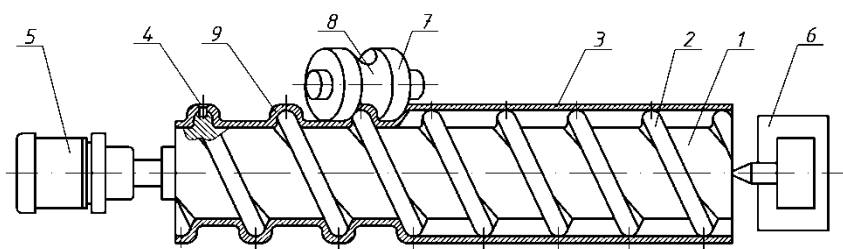


Рисунок 3 - Конструктивна схема способу виготовлення U-подібної гвинтової поверхні транспортної труби

Джерело: розроблено авторами

Інший спосіб (рис. 4) [24] передбачає, що на першому етапі на оправі 1, яка має U-подібний спіральний виступ 2, закріплюють стрічку прямокутного перерізу 3 за допомогою гвинтів 4. Після цього оправу 1 разом зі спіральним виступом 2 і стрічкою 3 фіксують у привідній опорі 5 та центрі 6.

На другому етапі формувальний ролик 7 з U-подібною виїмкою 8 притискається до стрічки прямокутного перерізу 3, у результаті чого по всій її довжині формується U-подібний спіральний виступ 9. Цей виступ утворюється шляхом вминання матеріалу стрічки за допомогою ролика 7, виїмка якого точно відповідає геометрії U-подібного спірального виступу 2, нанесеного на оправі 1. Для забезпечення точного формування ролик 7 встановлюється під кутом, який відповідає кроку спірального виступу 2 оправы 1. Довжина стрічки прямокутного перерізу 3 має відповідати довжині оправы 1 з нанесеним на ній виступом 2.

На третьому етапі кінці намотаної стрічки прямокутного перерізу 3 з сформованими на ній U-подібними спіральними виступами 9 з'єднують за допомогою зварного шва. Після цього конструкцію разом з оправою 1 знімають із привідної опори 5 та центра 6. Далі викручують гвинти 4, після чого виконують обережне скручування готової транспортної труби з U-подібними спіральними виступами 9 з оправы 1, що має відповідний спіральний виступ 2.

Приклад виконання способу виготовлення гвинтової заготовки, де повздовжня подача ролика повинна відповідати кроку U-подібного спірального виступу оправы, відображено в таблиці 2.

Вибір матеріалів для виготовлення спеціальних гвинтових профільних заготовок обумовлений поєднанням їхніх механічних, технологічних та економічних характеристик. Найдоцільнішим матеріалом, у цьому плані, є вуглецеві сталі марок 08 кп, Ст.3 та їхні зарубіжні аналоги, які мають достатню пластичність, зварюваність і здатність до холодної деформації, що критично важливо при формуванні гвинтових елементів із складним профілем. Відповідно застосування низьковуглецевих холоднокатаних сталей забезпечує стабільну якість поверхні, точність геометричних параметрів та високу однорідність структури матеріалу, що є надзвичайно важливою характеристикою під час виробництва спеціальних гвинтових профільних заготовок, де деформація має бути контрольованою та повторюваною. Для експлуатації у агресивних середовищах або за умов підвищених навантажень, доцільним є використання легованих або нержавіючих сталей (наприклад, 08X17T, 12X17, AISI 304, AISI 316), які мають підвищену корозійну стійкість, теплостійкість і міцність. У якості вихідних заготовок доцільно використовувати труби безшовні холодно- і гарячекатані, труби литі, смуговий холоднокатаний прокат, фізико-хімічні і механічно-конструктивні характеристики якого, визначені стандартом ДСТУ EN 10139:2019. Згідно нього для наших потреб оптимальними є товщини 1,5-4 мм. Оптимальна ширина смуги вибирається із стандартних розмірів у межах 40-250 мм. Даний матеріал є доступним і постачається металобазами рулонами, стрічками або порізаним у розмір згідно виробничих потреб.

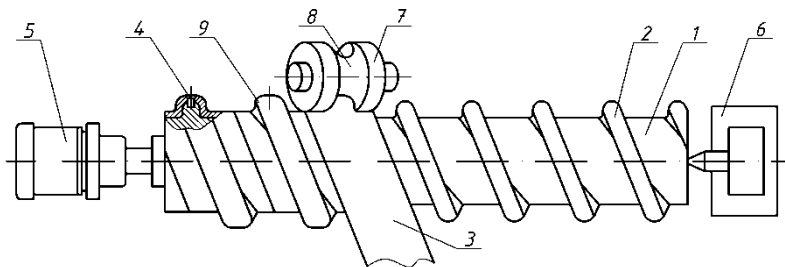


Рисунок 3 - Спосіб виготовлення гвинтових заготовок

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 - Конструктивні та технологічні характеристики реалізації способу формування U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб

№	Частота обертання, оправи, об/хв.	Повздожня подача формувального ролика, мм/об.	Крок U-подібного спірального виступу, мм	Діаметр оправи, мм	Товщина заготовки, мм	Висота U-подібних вминань, мм
1	0,083...0,15	70...120	70...120	100	0,8...1,5	5...50
2	0,125...0,225	120...180	120...180	150	1,0...2,0	5...70
3	0,166...0,3	170...240	170...240	200	1,5...2,5	5...90

Джерело: розроблено авторами

У випадку підвищених вимог щодо якості і точності кінцевих заготовок у якості вихідних доцільно використовувати труби і штаби холоднокатані експлуатаційні характеристики яких встановлені стандартом EN 10140-2006 або ж труби, стрічки і листи з конструкційних сталей з покриттям, отриманим безперервним способом зануренням в розплав, згідно EN 10326-2004.

Таким чином, правильний вибір марки матеріалу не лише забезпечує технологічність виготовлення, а й гарантує надійність та довговічність спеціальних гвинтових профільних заготовок в умовах реальної експлуатації.

Висновки. Запропоновано чотири нові способи виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб з використання оправок і формувальних роликів. Вони можуть реалізовуватися як виготовленням, шляхом вминання, U-подібних рифів

на готовій трубі, так і одночасним навиванням з U-подібним вмиванням стрічки прямокутного січення на оправу з U-подібним спіральним виступом, з подальшим скріпленням виступів навитої стрічки зварним швом. Розроблені способи виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб можна умовно поділити на два типи - із можливістю зміни висоти U-подібного рифу за рахунок зміни діаметр прутка пружини, та без такої можливості, в яких використовуються оправи з незмінною висоти U-подібного рифу. Для обох типів способів визначено і представлено раціональні конструктивно-технологічні параметри їхньої реалізації. Також в роботі визначено і охарактеризовано конструкційні матеріали для виготовлення гвинтових транспортних труб.

Список літератури

1. Гевко Б. М., Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л. Технологічні основи формоутворення різнопрофільних гвинтових заготовок деталей машин. Тернопіль: Вид-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 457 с.
2. Гевко Б.М., Ляшук О.Л., Гевко І.Б., Драган А.П., Новосад І.Я. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей, Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. 367 с.
3. Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л., Пилипець О. М. Передумови розроблення комбінованих операцій виготовлення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском. Перспективні технології та прилади. 2021. Вип. 18. С. 112–123.
4. Пилипець М. І. Науково-технологічні основи виробництва навивних заготовок деталей машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.03.01. Львів, 2002. – 35 с.
5. Vasylyk V., Pylypets M., Danylchenko L., Radyk D. Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. Scientific Journal of TNTU. Tern.: TNTU. 2021. Vol. 104. No. 4. P. 33–43. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033
6. Васильків В. В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.02.08. Львів, 2015. 48 с.
7. Васильків В. В. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату / В. В. Васильків, Л. Д. Радик, І. Б. Гевко // Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»): «Наукові нотатки» ЛДТУ. 2004. Вип. 14. С. 12–18.
8. Rogatinskiy R., Hevko I., Gypka A., Garmatyk O., Martsenko S. Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. Acta Technologica Agriculturae. Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae. 2017. No. 2. P. 36–41. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0007>
9. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів: монографія. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
10. Рогатинський Р. М. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження / Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Дячун А. Є., Мельничук А. Л., Слободян Л. М. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
11. Study of power parameters of the screw spirals forming // [Oleg Lyashuk, Roman Rogatynsky, Ivan Hevko, Tetiana Navrotska, Andrii Diachun] – Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 7th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2024, June 4–7, 2024, Pilsen, Czech Republic – Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering, P. 287-298.
12. Diachun A., Vasylyk V., Korol O., Myhailiuk V., Golovaty I., Kuras A. Investigation of geometrical parameters in screw surfaces whirling process. Scientific Journal of TNTU (Tern.). 2021. Vol. 101. No. 1. P. 68–78. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.01.068
13. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Дячун А.Є., Гупка А.Б., Третьяков О.Л. Технологічне проєктування та виготовлення гвинтових транспортно-технологічних робочих органів. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2025. 457 с.
14. Hevko. I.B., Dyachun A.Ye., Lyashuk O.L., Martsenko S.V., Gypka A.B. Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, 2016, - Vol. 49, № 2, p.77-82.
15. Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning // [Ivan Hevko, Andrii Diachun, Oleg Lyashuk, Yuriy Vovk, Andriy Hupka] – Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering, P. 385-394.
16. Ivan Hevko, Andriy Pik, Roman Komar, Oleh Stibaylo, Serhiy Koval' Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies : Scientific Journal of TNTU. Ternopil.: TNTU, 2024. Vol 113. No 1. P. 5–15.

17. Гевко І.Б., Лещук Р.Я., Брикса А.О., Стібайло О.Ю., Коваль С.О. Особливості конструкцій і технологічного проектування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2023. - Вип. 8(39). Част.2. С. 24-34.
18. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
19. Гевко І.Б., Дячун А.Є., Дубиняк Т.С., Стібайло О.Ю., Гупка А.Б. Технологічні особливості виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2025. - Вип. 11(42). Част.1. С. 75-83.
20. Патент на корисну модель № 158211. Україна, МПК B21D 9/00, B21D 9/10 (2006.01). Спосіб виготовлення гвинтових транспортних труб / Гевко І.Б., Пік А.І., Гевко Б.Р., Мосій О.Б., Гарматюк О.О., Стібайло О.Ю., Пік М.А. (Україна). – № u2024 02778. Заявл. 24.05.2024р.; Опубл. 09.01.2025р., Бюл.№2.
21. Патент на корисну модель № 158470. Україна, МПК B21H3/12, B21D11/06. Спосіб виготовлення гвинтових заготовок / Гевко І.Б., Пік А.І., Гевко Б.Р., Мосій О.Б., Гарматюк О.О., Стібайло О.Ю., Пік М.А. (Україна). – № 202402777. Заявл. 24.05.2024р.; Опубл. 13.02.2025р., Бюл.№7.
22. Патент на корисну модель № 157048. Україна, МПК B21H 3/12, B21D 11/06. Спосіб виготовлення гвинтових заготовок / Гевко І.Б., Пік А.І., Комар Р.В., Гевко Б.Р., Брикса А.О., Коваль С.О., Стібайло О.Ю. (Україна). – № u2024 00164. Заявл. 11.01.2024р.; Опубл. 05.09.2024р., Бюл.№36.
23. Патент на корисну модель № 157208. Україна, МПК B21H 3/12, B21D 11/06. Спосіб виготовлення гвинтових заготовок / Гевко І.Б., Пік А.І., Комар Р.В., Гевко Б.Р., Брикса А.О., Коваль С.О., Стібайло О.Ю. (Україна). – № u2024 00167. Заявл. 11.01.2024р.; Опубл. 19.09.2024р., Бюл.№38.

References

1. Hevko, B. M., & Pylypets, M. I. (2009). *Technological principles of forming multi-profile screw blanks of machine parts*. BM Hevko, MI Pylypets et al. [in Ukrainian]
2. Hevko, B. M., Lyashuk, O. L., Hevko, I. B., Dragan, A. P., & Novosad, I. Ya. (2008). *Technological principles of forming special profile screw parts*. Ternopil: SMP "Type". [in Ukrainian]
3. Radyk, D. L., Pylypets, M. I., Vasylykiv, V. V., & Pylypets, O. M. (2021). Preconditions for the development of combined operations for manufacturing screw and auger blanks by metal forming. *Prospective Technologies and Devices*, (18). [in Ukrainian]
4. Pylypets, M. I. (2002). *Scientific and technological foundations of manufacturing coiled blanks of machine parts*. Lviv: National University "Lviv Polytechnic". [in Ukrainian]
5. Vasylykiv, V., Pylypets, M., Danylchenko, L., & Radyk, D. (2022). Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Bulletin of Ternopil National Technical University*, 104(4), 33–43. [in English]
6. Vasylykiv, V. V. (2015). *Development of scientific and applied principles for designing technologies of manufacturing screw and auger blanks using unification*. [in Ukrainian]
7. Vasylykiv, V. V., Radyk, L. D., & Hevko, I. B. (2004). Technological and design features of manufacturing screw blanks from sheet metal. *Scientific Notes of Lviv State Technical University*, 12–18. [in Ukrainian]
8. Rogatynskiy, R., Hevko, I., Gypka, A., Garmatyk, O., & Martsenko, S. (2017). Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. *Acta Technologica Agricultrae*, 20(2), 36–41. [in English]
9. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., & Diachun, A. Ye. (2014). *Scientific and applied foundations for the creation of screw transport-technological mechanisms*. [in Ukrainian]
10. Rohatynskiy, R. M., Hevko, I. B., Lyashuk, O. L., Hud, V. Z., Diachun, A. Ye., Melnychuk, A. L., & Slobodian, L. M. (2019). *Prospective screw conveyors: design, calculation, research: monograph*. Ternopil: Palianytsia V. A. [in Ukrainian]
11. Lyashuk, O., Rogatynskiy, R., Hevko, I., Navrotska, T., & Diachun, A. (2024). Study of power parameters of the screw spirals forming. In *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange* (pp. 287–298). Cham: Springer Nature Switzerland. [in English]
12. Diachun, A., Vasylykiv, V., Korol, O., Myhailiuk, V., Holovatyi, I., & Kuras, A. (2021). Investigation of geometrical parameters in screw surfaces whirling process. *Bulletin of Ternopil National Technical University*, 101(1), 68–78. [in English]
13. Hevko, I. B., Lyashuk, O. L., Diachun, A. Ye., Hupka, A. B., & Trnetyakov, O. L. (2025). *Technological design and manufacturing of screw transport-technological working elements*. [in Ukrainian]
14. Hevko, I. B., Dychun, A. Y., Lyashuk, O. L., Martsenko, M., & Gypka, A. B. (2016). Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. [in English]
15. Hevko, I., Diachun, A., Lyashuk, O., Vovk, Y., & Hupka, A. (2021). Study of dynamic and power parameters of the screw workpieces with a curved profile turning. In *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange* (pp. 385–394). Cham: Springer International Publishing. [in English]

16. Hevko, I., Pik, A., Komar, R., Stibaylo, O., & Koval, S. (2024). Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies. *Bulletin of Ternopil National Technical University*, 113(1), 5–15. [in English]
17. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Bryksa, A. O., Stibailo, O. Yu., & Koval, S. O. (2023). Features of designs and technological design of paddle screw mixer working bodies. [in Ukrainian]
18. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Hud, V. Z., Dmytriv, O. R., Dubyniak, T. S., Navrotska, T. D., & Kruhlik, O. A. (2019). *Flexible screw conveyors: design, manufacturing technology, experimental research*. [in Ukrainian]
19. Hevko, I. B., Diachun, A. Ye., Dubyniak, T. S., Stibaylo, O. Yu., & Hupka, A. B. (2025). Technological features of manufacturing chopper knives on screw spirals. [in Ukrainian]
20. Hevko, I. B. (2025). *Method of manufacturing screw transport pipes* (Ukrainian Patent No. 158211). Ternopil Ivan Puluj National Technical University. [in Ukrainian]
21. Hevko, I. B. (2025). *Method of manufacturing screw billets* (Ukrainian Patent No. 158470). Ternopil Ivan Puluj National Technical University. [in Ukrainian]
22. Hevko, I. B. (2024). *Method of manufacturing screw blanks* (Ukrainian Patent No. 157048). Ivan Puluj Ternopil National Technical University. [in Ukrainian]
23. Hevko, I. B. (2024). *Method of manufacturing screw blanks* (Ukrainian Patent No. 157208). Ivan Puluj Ternopil National Technical University. [in Ukrainian]

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Roman Rohatynskyi**, Prof., DSc., **Roman Komar**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Tkachenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Gypka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Technological Design of Methods for Manufacturing U-Shaped Helical Surfaces of Transport Pipes

The process of technological design and manufacturing of special screw blanks is accompanied by a number of technical and production problems that require systematic analysis and comprehensive solutions. One of the main problems is the difficulty of ensuring high accuracy of the geometric parameters of screw surfaces, especially in conditions of single or small-scale production. Such surfaces have a complex spatial shape, which requires the use of specialized tools, high-precision equipment and modern control methods. Another important challenge is the choice of the optimal method of forming the workpiece depending on the material, design requirements and operating conditions. In this case, it is necessary to take into account not only technical characteristics, but also the economic feasibility of production, equipment costs, and energy intensity of the process. Another problem is achieving the required mechanical properties of the product (strength, wear resistance, fatigue endurance), which often requires the implementation of additional technological operations, in particular heat treatment or surface hardening. All these factors complicate technological planning, increase the risks of defects and increase the cost of production. Thus, the main problem is to develop rational and technically efficient technological methods that are capable of ensuring the manufacture of special screw blanks with the required characteristics at minimal production costs.

Modern scientific works in this area of research highlight a wide range of approaches to obtaining special screw blanks, including methods of winding, rolling, stamping, pressing, etc., each of which has its own advantages and limitations depending on the type of material, spiral geometry, and operating conditions of the product. Particular attention is paid to increasing the manufacturability of special equipment designs, in particular by improving design solutions, reducing energy consumption and material consumption in the manufacturing process, as well as developing specialized technological tools. Recent research in the field of technological design and manufacturing of special screw blanks covers a wide range of innovative approaches aimed at increasing production efficiency, reducing energy consumption, and improving product quality. In particular, such approaches as multi-level classification of screw and auger billet designs were proposed; morphological analysis for the synthesis of new methods of winding screw billets; optimization of technological processes for manufacturing screw billets, in particular, by unifying designs and implementing modern design methods.

The work substantiates four new methods for manufacturing U-shaped helical surfaces of transport pipes using frames and forming rollers. The developed methods can be implemented in different ways. In particular, by indenting U-shaped ridges on the finished pipe, or by simultaneously winding and U-shaped indenting a rectangular-section strip onto a frame with a U-shaped spiral protrusion, followed by fastening the protrusions of the wound strip with a weld. In general, the developed methods for manufacturing U-shaped helical surfaces of transport pipes can be conditionally divided into two types - with the possibility of changing the height of the U-shaped ridge by changing the diameter of the spring bar, and without such a possibility, in which frames with a constant height of the U-shaped ridge are used. The work also defines and characterizes the structural materials for the manufacture of helical transport pipes. As starting materials, it is advisable to use seamless cold- and hot-rolled pipes, cast pipes, and cold-rolled strip products. For both types of methods, rational structural and technological parameters for their implementation are defined and presented.

U-shaped, helical surface, workpiece, method, transport pipe, forming roller, operation, spiral protrusion

Одержано (Received) 14.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 16.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

УДК 678.07.029

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.117-126](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.117-126)

П. М. Єрьомін, канд. техн. наук, **А. М. Кириченко**, д-р техн. наук, проф.,
А. І. Гречка, доц., канд. техн. наук, **А. Р. Апаракін**, канд. техн. наук, **Є. О. Ніщепенко**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: p24124@gmail.com

Сучасний стан та перспективи розвитку пристроїв для механічного подрібнення пластикових відходів 3D друку під час їх вторинної переробки

Проведений аналіз сучасного стану існуючих технологій та обладнання для вторинної переробки відходів з пластику, які утворюються під час 3D друку, шляхом механічного подрібнення пластику та подальшої переплавки в гранули або готові вироби. Розглянуті існуючі методи подрібнення пластикових відходів та компоновки механічних пристроїв для їх переробки. Наведені варіанти виконання різальних дискових ножів з різною кількістю різальних зубців, а також з різними формами центральних отворів для кріплення на обертальних валах шредера. Розглянуті види матеріалів, які використовуються для виготовлення ножів та валів. На основі наведеної інформації запропонована схема, де зображено основні етапи проектування шредера зі змінним ножами.

вторинна переробка, пластик, механічне подрібнення, шредер, геометрія ножів, 3D друк

Постановка проблеми. Деталі із різних видів пластику складають значну частину в сучасних машинах та механізмах, що дозволяє зекономити чорні та кольорові метали, знизити вагу деталей, підвищити стійкість виробів до корозії, а також забезпечити вторинну переробку складових частин техніки після закінчення строку її експлуатації.

Правильно організована утилізація техніки з відпрацьованим ресурсом забезпечує максимально ефективний процес переробки деталей, суттєво скорочує споживання природних ресурсів та запобігає забрудненню навколишнього середовища. Також важливо, що в країнах Європейського Союзу, кандидатом на вступ до якого є Україна [1], діють суворі законодавчі вимоги щодо обов'язкової утилізації техніки, які забороняють її викидання на смітники. Це необхідно для зниження забруднення оточуючої природи, так як неправильна утилізація відпрацьованої техніки призводить до значних викидів різноманітних шкідливих речовин у довкілля та подальшого негативного впливу на здоров'я людей та тварин.

За останні роки в Україні збільшився інтерес суспільства до екологічних проблем, що зокрема викликало суттєвий розвиток галузі з переробки відходів пластику. Підприємства, що спеціалізуються в цій сфері, активно впроваджують сучасні технології з вторинної переробки пластикових відходів, які дозволяють дотримуватись вимог щодо з екологічної безпеки та використовують новітнє обладнання для оптимізації процесу переробки і зменшення шкідливих викидів. Також слід відмітити, що зараз в Україні є значна потреба у технічних пластиках власного виробництва для виробів військового та цивільного призначення, отриманих, зокрема, і методом пошарового наплавлення (FDM) на 3D принтерах. Враховуючи можливість виготовлення деталей з вторинної сировини (наприклад з пластику марки ABS) та її великі обсяги, необхідність в удосконаленні існуючих технологій з переробки таких відходів є досить актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо [2,3], повністю синтетичні пластики або пластмаси з'явилися на початку XX сторіччя. З часом стало зрозумілим, що нафтохімічна промисловість під час виробництва різноманітних пластиків завдає серйозної шкоди природі та здоров'ю людей. Різнманітні барвники, пластифікатори та антипірени значно покращують якості матеріалу та роблять його більш гнучким або міцним. Але внаслідок старіння та часткового розкладу матеріалу шкідливі речовини виділяються з нього і потрапляють у воду, ґрунт та повітря.

Дотепер у малорозвинених країнах утилізація пластику відбувається за рахунок використання застарілих та небезпечних для довкілля методів заповування сміття у ґрунті, а також їх простого спалювання на відкритому повітрі. Це дешево, але вкрай небезпечно для оточуючого середовища як зараз, так й в майбутньому за рахунок його великого забруднення. Переробка відпрацьованих пластикових виробів на сучасних лініях [4,5] включає в себе такі операції, як збір та сортування вживаного пластику з різних локацій, його подрібнення, мийку, сушку, сепарацію, переплавлення в гранули або виготовлення готових виробів із відновленої сировини. Вторинна переробка пластику є економічно вигідною [6,7], що дозволяє сучасним спеціалізованим компаніям розвивати свої екологічні виробництва, використовувати новітні технології та організовувати майже повну переробку пластикових відходів з виробництв та деталей, що відпрацьовали свій ресурс.

В процесі вторинної переробки застосовуються декілька способів подрібнення пластику, які представлені на рис. 1.

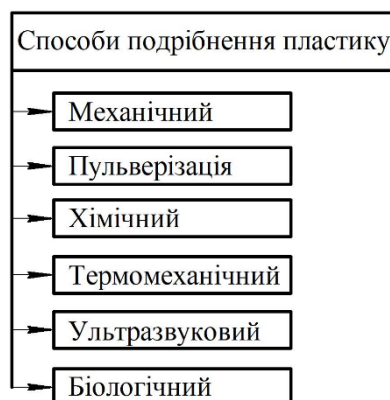


Рисунок 1 – Способи подрібнення пластику

Джерело: розроблено авторами

Кожен із зазначених методів має свої недоліки та переваги. Наприклад, хімічний метод вимагає застосування коштовних та небезпечних хімікатів, а використання спеціальних бактерій для біологічного розкладу пластику ще має суттєві обмеження по його номенклатурі. Тому кінцевий вибір переробки залежить від типу пластику, його кількості та економічних факторів. З розвитком технологій вторинної переробки та зростанням попиту на відновлений пластик, існуючі методи подрібнення весь час вдосконалюються. Серед розглянутих методів зупинимось на механічному подрібненні термопластичного пластику типу ABS, як такого, що має високу пружність і ударостійкість. ABS широко застосовується в різних сферах машинобудування та складає велику частину в відпрацьованих деталях. Також модифікації ABS пластику є чи не найрозповсюдженішими для 3D друку методом FDM. В існуючих технологіях вторинної переробки пластика широко використовують механічні пристрої, які подрібнюють його на окремі частини за допомогою комплексу обертальних ножів з декількома лезами [8]. Цей метод є ефективним для переробки великої кількості пластику. Для цього були розроблені пристрої типу дробарок або шредерів, які в своїй

робочий камері розрізають пластик на тонкі смужки або шматки. Сучасні пристрої типу шредерів є подальшим вдосконаленням ножових дробарок. Зазвичай вони мають від одного до трьох (більша кількість зустрічається дуже рідко) обертальних валів з комплектом ріжучих дискових лез, які разом з нерухомими ножами подрібнюють пластик. Шредери зазвичай використовуються для переробки пластикових виробів середніх та великих розмірів, наприклад таких як каністри з під хімічних речовин, корпуси різноманітних приладів та побутової техніки або пластикові деталі від механічних транспортних засобів. Основні види шредерів з обертальними валами зведені у табл. 1.

Таблиця 1 - Основні види шредерів з обертальними валами

Тип шредера	Основні характеристики	Застосування	Переваги	Недоліки
З одинарним валом (Single Shaft Shredder)	Один вал з ножами, що обертається	Подрібнення великих об'ємів матеріалів: пластик, гумові вироби, текстиль	Простота конструкції, надійність	Повільна обробка матеріалу, можлива часткова засміченість валів
З двома валами (Double Shaft Shredder)	Два вали з ножами, що обертаються в протилежних напрямках	Подрібнення міцних синтетичних матеріалів, металу, деревини	Висока ефективність, можливість роботи з великими об'ємами матеріалу	Вищі витрати енергії, більший рівень шуму
З трьома валами (Triple Shaft Shredder)	Три вали для інтенсивнішого подрібнення	Обробка жорстких матеріалів та сплавів	Вища ефективність, менша ймовірність засмічення	Складніша конструкція, дорожчі витрати на обслуговування
Ударний шредер (Impact Shredder)	Використовує ударні робочі елементи з високою швидкістю обертання для подрібнення матеріалу	Легкі матеріали, текстиль, пластикові відходи.	Висока швидкість обробки, ефективність при обробці м'яких матеріалів	Шумність, можливість пошкодження м'яких матеріалів
Конусний шредер (Cone Shredder)	Має конусну форму робочих органів для подрібнення	Каміння, бетон, метал.	Висока ефективність при роботі з жорсткими матеріалами	Потребує високих витрат на обслуговування
Плоский шредер (Flatbed Shredder)	Ножі для подрібнення рухаються по плоскій поверхні	Більшість органічних відходів, пластик	Простота конструкції, доступна ціна	Обмежена потужність при обробці великих обсягів

Джерело: розроблено авторами

Відповідно до джерела [6], механічне подрібнення являє собою метод зменшення розмірів кусків матеріалів (в нашому випадку – пластикових відходів) для отримання частинок певного розміру, який потім поступає на переплавлення в гранули або готові вироби. Найбільший інтерес представляє перероблений пластик, розміри часток якого відносяться до середнього та дрібного класу подрібнення.

Саме частки такого розміру добре підходять для подальшого переплавлення в гранули або готові вироби. У випадку застосування шредера подрібнення оброблюваного пластика виконується шляхом комбінованого роздавлювання,

розколювання, розламування, різання та розривання його кусків під дією рухомих та нерухомих ножів пристрою.

Таблиця 2 - Класи подрібнення

Клас подрібнення	Розмір частин, мм	
	До подрібнення	Після подрібнення
Середнє	250	20
Дрібне	20	1...5

Джерело: [2,4]

До переваг механічного способу подрібнення можна віднести його здатність подрібнювати великі обсяги пластику, економічність, екологічність та універсальність. Це дозволяє значно розширити сферу застосування дробарок та шредерів. Однак, також слід відмітити й недоліки пристроїв для механічного подрібнення, а саме – необхідність регулярного обслуговування та переточування ріжучих елементів стаціонарних та рухомих ножів внаслідок їх підвищеного зносу. Якість подрібнення пластику напряму залежить від геометрії дискових ножів, а саме – кількості ріжучих зубців, кута різання, форми поверхні захоплення та товщини леза S (рис. 2). При певних умовах механічне подрібнення не забезпечує достатню однорідність та якість кінцевого продукту, що призводить до зменшення якості переробки та потребує додаткових операцій обробки [9].

Висока енергоємність процесу (особливо при обробці великих обсягів матеріалу), вимагає застосування механічних понижуючих редукторів та підключення до потужних джерел живлення. На рис. 3а представлено загальний вигляд типового шредера у вигляді 3D моделі, а на рис. 3б його робочу камеру з двома обертальними валами.

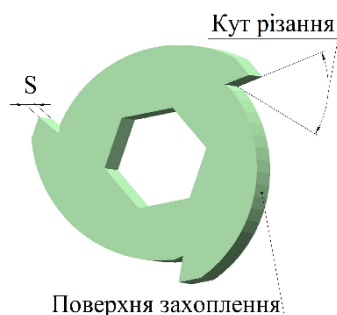


Рисунок 2 – Дисковий ніж

Джерело: розроблено авторами

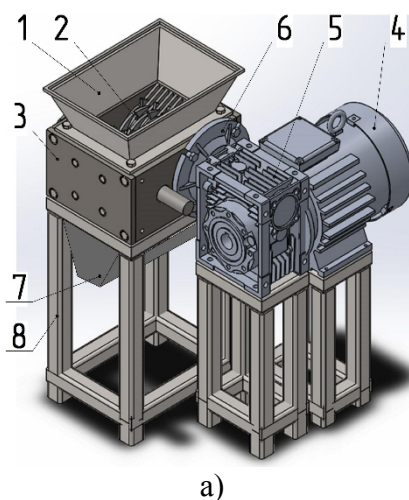
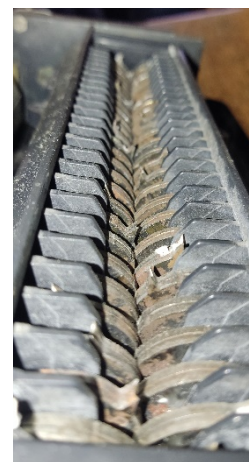


Рисунок 3 – а) 3D модель загального вигляду типового шредера; б) Робоча камера шредера з двома валами

Джерело: розроблено авторами



б)

Його основними компонентами є завантажувальний бункер 1 для пластикових відходів та пара обертальних валів 2, на яких розташовані наборні пакети дискових різальних елементів (ножів) разом з дистанційними шайбами. Вали обертаються із заданою частотою на опорних підшипниках назустріч один одному, що дозволяє ефективно розрізати матеріал, якій потрапляє між ножами. Ножі можуть мати дві або більше різальних лез, робочі поверхні яких мають спеціальну геометрію для кращого подрібнення. Набор дискретних ножів зрізає вузькі смужки пластику від крупних

кусків, які після цього додатково розрізаються іншим ножом. При цьому, внаслідок одночасної дії на подрібнюваний пластик декількох різальних крайок ножів забезпечується зниження вібрацій, ударів та поштовхів під час роботи шредера. Подрібнення пластику здійснюється безперервним відокремленням від нього дрібних шматочків. Торцеві стінки корпусу шредера 3 призначені для розміщення підшипникових опор для ріжучих валів, а також на ньому закріплюються блоки нерухомих ножів. Знизу корпус має отвори для проходження подрібненого матеріалу. Система приводу складається з двигуна 4, який через понижуючий редуктор 5 та запобіжну муфту 6 забезпечує обертання ножових валів з заданою частотою. Найчастіше в шредерах використовуються електричні трьохфазні двигуни змінного струму з системою регулювання обертів. Вихідний бункер 7 збирає подрібнений матеріал після обробки, сепарує його через сита та може бути оснащений механізмом для транспортування матеріалу на наступний етап переробки. Системи безпеки включають в себе захисні кожухи, системи аварійної зупинки та датчики для контролю роботи обладнання. Всі складові частини шредера монтуються на жорсткій рамі 8.

Огляд існуючих технологій та конструкцій шредерів для механічного подрібнення технічного пластику типу ABS свідчить про те, що такий спосіб є ефективним й високопродуктивним, та може бути вдосконалений за рахунок використання змінних обертальних ножів з покращеною геометрією різальних елементів та оптимізованих режимів різання.

Постановка завдання. На основі аналізу сучасного стану існуючих методів подрібнення пластику, а саме – технології вторинної переробки відходів пластику шляхом його механічного подрібнення та подальшої переплавлення в гранули або готові вироби запропонувати заходи щодо підвищення ефективності існуючого технологічного процесу;

- виконати тривимірне проектування обертальних валів в зборі з ножами для механічного подрібнювача відходів із пластика марки ABS та проаналізувати різні варіанти їх виконання;
- запропонувати шляхи вдосконалення конструкції робочої камери шредера;
- навести схему основних етапів розробки конструкції шредера зі змінними ножами.

Виклад основного матеріалу. Однією із умов якісної та максимально продуктивної роботи шредера є забезпечення сталого та рівномірного завантаження кусків перероблюваного пластику в робочу камеру до ножів шредера. Необхідно, щоб пластик не застрягав або надмірно заповнював зону різання, що може призвести до неефективної роботи вхолосту або поломки обладнання внаслідок його перевантаження. Якщо шредер має вертикальну або нахилену камеру завантаження, можна використовувати силу тяжіння для самостійного спрямування матеріалу до ножів. Це добре працює, коли перероблюваний пластик має відносно рівну форму і достатньо важкий, щоб самостійно, не зупиняючись, переміщатися вниз. Такий спосіб найбільш простий і енергоефективний, оскільки не потребує додаткових механічних систем, однак він підходить тільки для частинок пластику, які мають певну правильну форму та вагу. Легкі пластикові елементи довільної форми можуть падати не рівномірно або застрягати внаслідок скупчування в камері завантаження.

З метою уникнення цього явища в сучасних шредерах передбачено використання механічних пристроїв для примусового ворошіння у вигляді лопатей (рис. 4), обертових валків або барабанів, які періодично занурюються у скупчення пластику та направляють його вниз до обертальних дискових ножів. Перевагами такого підходу є забезпечення постійного та рівномірного надходження кусків пластика до

робочої зони шредера, особливо для легких відходів складної форми, які не можуть самостійно рухатися вниз під дією сили тяжіння. До недоліків слід віднести додаткову складність механізму шредера та підвищення енергоємності процесу подрібнення. Також збільшується зношування робочих органів шредера.

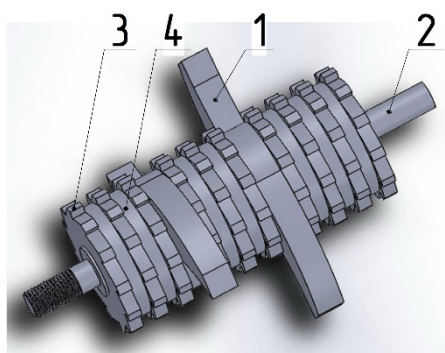


Рисунок 4 – Пристрій для ворущіння: 1 – Лопать для ворущіння; 2 – Обертальний вал;
3 – Різальний ніж; 4 – Дистанційна шайба

Джерело: розроблено авторами

Притискні ролики або лінійні механізми застосовуються для подачі кусків пластику до ножів, забезпечуючи оптимальний тиск і рівномірність подачі. Їхньою перевагою є стабільна і контрольована подача матеріалу до обертальних ножів, що запобігає перегріву шредера або надмірному навантаженню на один із різальних елементів. Недоліком є потреба в додаткових механізмах та підвищеному енергоспоживанні. Також можуть виникнути проблеми з надмірним тиском на оброблюваний матеріал, що може призвести до його скупчення у бункері.

Найбільш раціональним є комбіноване застосування обох підходів, де для первинного подавання матеріалу до шредера використовують силу тяжіння, а потім в роботу вступають ворущилки або притискні механізми для забезпечення рівномірного подавання пластику до обертальних ножів. Це дозволяє скористатися перевагами кожного з методів без значних недоліків. На основі вищенаведеного можна зробити висновок, що для сталого завантаження пластику типу ABS в шредерах малої потужності найкраще використовувати комбінацію сили тяжіння разом з ворущилками або змішувачами і притискними механізмами. Це дозволить забезпечити рівномірний і стабільний потік матеріалу, що сприятиме ефективності роботи шредера і зменшить ймовірність проблем із завантаженням.

Дискові леза для механічних шредерів виготовляються з металевих сплавів, які повинні забезпечувати високу твердість, стійкість до зношування та міцність в умовах тривалого використання. В якості матеріалів для виготовлення ножів застосовують [10] такі вітчизняні марки сталей, як леговану інструментальну сталь марки 9XC, вуглецеву сталь У10А, високолеговану сталь для виготовлення ріжучих інструментів Р6М5 та леговану вуглецеву сталь 65Г. Серед імпорتنих матеріалів за стандартами ISO найчастіше використовують інструментальні сталі класу HSS (High-Speed Steel) марок М2 або М42, хромисту сталь AISI 52100 або нержавіючі сталі типу AISI 420/AISI 440С. В окремих випадках робочі частини ножів можуть бути виготовлені із високоякісних твердих сплавів на основі карбіду вольфраму, особливо якщо необхідна робота з дуже жорсткими та абразивними матеріалами. Однак інструмент з твердих сплавів коштує дорого, він складний у виготовленні та переточуванні й використовується, як правило, в умовах, де є надзвичайно високі вимоги до його зносостійкості.

Існує декілька способів кріплення дискових ножів на обертальних валах шредера. Серед них найбільш технологічним вважається спосіб, коли робоча частина

обертального валу та середній отвір дискового ножа мають однакову форму, наприклад лиску, паз під шпонку, квадрат, гранений отвір тощо (рис. 5).

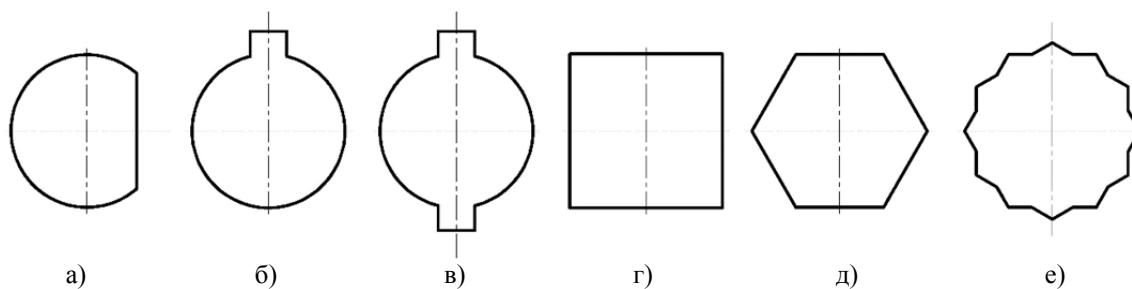


Рисунок 5 – Форми центральних отворів ножів: а) Лиска; б) Шпонка; в) Подвійна шпонка; г) Квадрат; д) Шестигранник; е) Подвійний шестигранник

Джерело: розроблено авторами

Змінні різальні ножі з багатограними центральними отворами для шредерів (рис. 6) є перспективним напрямком конструкторських рішень, вони мають як переваги, так й певні недоліки, які слід враховувати при їх застосуванні. До переваг змінних різальних ножів з багатограними отворами можна віднести легкість заміни та обслуговування, зручність у ремонті та рівномірний знос, зменшення витрат на заміну ножів, гнучкість конструкції та зниження шуму і вібрацій.

До недоліків змінних різальних ножів з багатограними отворами слід віднести потребу в точному монтажі, більшу складність та вартість виготовлення, знос граней отворів в умовах високих навантажень або при роботі з жорсткими матеріалами [11]. Неправильне розташування або закріплення ножів може призвести до неефективної роботи шредера, нерівномірного зношування або навіть пошкодження механізмів. Це вимагає додаткової уваги до процесу монтажу дискових ножів та їх регулювання.



Рисунок 6 – Варіанти виконання різальних дискових ножів з шестигранним центральним отвором та різною кількістю різальних зубців

Джерело: розроблено авторами

Під час роботи обертальні вали сприймають високі навантаження на згин та скручування, тому їх виготовляють із матеріалів [10] типу сталь 45, 40X, 40XФ та 9ХС або їх імпорتنих аналогів С45, С40Н, С40НФ, С9S у вигляді круглого, квадратного або шестигранного прокату. Самі ножі виготовляються із круглого або листового прокату методом механічної обробки різанням (операції точіння та фрезерування), а також протягування або дорнування центрального отвору, потім піддаються термічній обробці гартуванням, заточуються та балансуються (за потреби).

Під час монтажу дискових ножів на обертальні вали робочі зазори між ними виставляються за допомогою дистанційних та регулювальних шайб. Осьовий зазор між валом і дисковими ножами для шредера є важливим параметром, оскільки він

безпосередньо впливає на ефективність подрібнення, зносостійкість ножів та загальну продуктивність шредера. Потрібно правильно налаштувати цей зазор, щоб забезпечити ефективне різання та довговічність ножів. Для звичайних пластиків мінімальний зазор може бути близько 0,1–0,5 мм. Це дає достатньо простору для ефективного різання, при цьому зберігаючи точність роботи ножів. За відсутності точного регулювання або в разі забруднення механізмів шредера зазор може збільшуватися, що призведе до зменшення ефективності різання та швидшого зносу ножів.

На основі наведеної інформації запропонована схема, де зображено основні етапи проектування шредера зі змінним ножами (рис. 7).

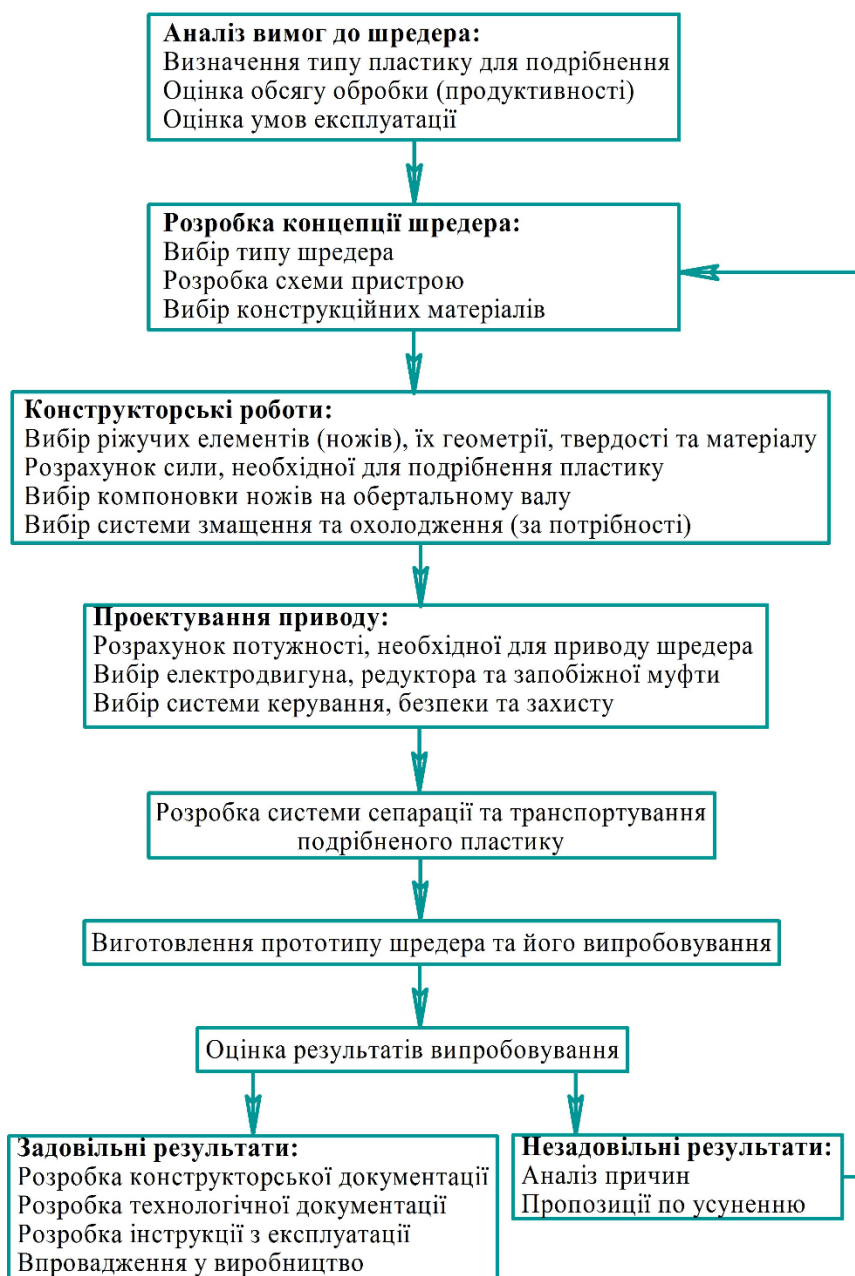


Рисунок 7 – Основні етапи проектування модульного шредера

Джерело: розроблено авторами

Висновки. 1) Сучасні шредери відрізняються великою різноманітністю конструкторських рішень та видами перероблюваних матеріалів. Одним із перспективних напрямків подальшого розвитку механічних шредерів є використання

конструкцій зі змінними ножами, що дозволяє на основі готових конструкторських рішень запропонувати споживачу найбільш оптимальну конфігурацію обладнання за видом перероблюваного матеріалу, продуктивності, а також типу робочих дискових ножів. Саме від геометрії різальних крайок, їхньої кількості та способу взаємного розташування ножів на обертальних валах залежить якість подрібнення та розміри отриманих часток пластику.

2) Використання шредерів зі змінними ножами покращує швидке переналагоджування та налаштування робочих вузлів, що дозволить за потреби оперативно перейти на інший вид пластику, а також варіювати розміри подрібнених частинок після переробки вторинної сировини. Враховуючи важливість збереження навколишнього середовища, подальше вдосконалення конструкцій шредерів для механічного подрібнення відпрацьованого пластику та відходів 3D-друку є перспективним та актуальним напрямком.

3) На основі проведених досліджень запропоновано схему, на якій зображено основні етапи проектування шредера зі змінним ножами.

Список літератури

1. Інтерньюз-Україна. Система законодавства ЄС у сфері охорони довкілля, її основні відмінності від екологічного законодавства України: Веб-сайт. URL: <https://internews.ua/storage/app/media/rang/Materials/2024/EU/EUEcology1.pdf>
2. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Інжиніринг пакування та пакувального обладнання» спеціальності 131 «Прикладна механіка» та «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / І. О. Мікульонюк. 2-ге вид., переробл. та доповн.; – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с.
3. Екологістика, рециклінг і утилізація транспорту: навч. посіб. / Бойченко С. В та ін. (за ред. проф. С. В. Бойченка). – Київ: НАУ, 2019. 266 с.
4. ПЛАСТ-ЛОМ. Переробка відходів пластику: веб-сайт. URL: <https://plast-lom.com.ua/pererobka-vidhodiv-plastiku/> (дата звернення: 10.03.2025)
5. Михайлова Є. О., Дейнека Д. М., Панчева Г. М. Аналіз методів перероблення пластикових відходів. Вісник НТУ«ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 80–89. DOI:10.20998/2413-4295.2021.01.12.
6. Paweł Ciężkowski; Sebastian Bak; Jacek Caban; Jarosław Seńko; Mateusz Adam Waśkowicz. Preliminary Research to Assess the Possibility of Grinding Selected Plastics Using Crushers. *Polymers* 2024, 16, 3104. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16223104>
7. Adriyan; Sufiyanto; Marfizar-St Mt. Investigasi tegangan kerja pada pisau pencacah di mesin shredder-extruder dalam satu penggerak utama menggunakan Metode Elemen Hingga. *TURBO Vol. 12 No. 1. 2023 Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*. DOI: <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v12i1.2269>
8. J. H. Wong; M. J. H. Gan; B. L. Chua; M. Gakim; N. J. Siambun. Shredder machine for plastic recycling: A review paper. *Material and Energy Engineering for Sustainable Advancement (MEESA 2021)*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1217 (2022) 012007. DOI:10.1088/1757-899X/1217/1/012007
9. Sabiha Sarwar; Molla Rahman Shaibur; Fariha Farzana; Masum Howlader. Conversion of PP-type plastic caps to plastic rope and the instruments involved: A case report. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100882>
10. Вибір матеріалів для лез промислових подрібнювачів: Веб-сайт. URL: <https://maxtormetal.com/choose-industrial-shredder-blade-material-extend-lifespan-maintenance-tips-tungsten-carbide-tool-steel-carbon-stainless/> (дата звернення 31.10.2024)
11. Всебічний аналіз подрібнювачів з двома валами: Веб-сайт. URL: <https://maxtormetal.com/dual-shaft-shredders-blades-teeth-knife/> (дата звернення 31.10.2024)

References

1. Internews Ukraine. (2025, March 10) [internews.ua] The EU Environmental Legislation System, its Main Differences from Ukraine's Environmental Legislation: website. <https://internews.ua/storage/app/media/rang/Materials/2024/EU/EUEcology1.pdf> [in Ukrainian]
2. Technological Foundations of Polymer Material Recycling [Electronic Resource]: A textbook for Bachelor's degree students in the educational programs 'Packaging Engineering and Packaging Equipment' of specialty 131 'Applied Mechanics' and 'Engineering Equipment for the Production of Polymer and Building Materials and Products' of specialty 133 'Industrial Engineering' / I. Mikulionok. 2nd ed., revised and expanded; – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. 292 pages. [in Ukrainian]
3. Ecologistics, Recycling, and Waste Management in Transportation: A textbook / S. Boychenko et al. (edited by Prof. S. Boychenko). – Kyiv: National Aviation University, 2019. 266 pages. [in Ukrainian]
4. ПЛІАКТ-ІОМ. (2025, March 10). Plastic Waste Recycling [Plast-lom.com.ua]. Recycling of plastic waste: website. <https://plast-lom.com.ua/pererobka-vidhodiv-plastiku/> [in Ukrainian]
5. Mykhailova E., Deineka D., Pancheva H. Analysis of plastic waste recycling methods. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 80–89. DOI:10.20998/2413-4295.2021.01.12 [in Ukrainian]
6. Ciężkowski, P., Bak, S., Caban, J., Senko, J., & Waśkowicz, M. A. (2024). Preliminary Research to Assess the Possibility of Grinding Selected Plastics Using Crushers. *Polymers*, 16. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16223104>
7. Adriyan; Sufiyanto; Marfizal-St Mt. (2023). Investigasi tegangan kerja pada pisau pencacah di mesin shredder-extruder dalam satu penggerak utama menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro TURBO* Vol.12 No.1. DOI: <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v12i1.2269>
8. J. H. Wong; M. J. H Gan; B. L. Chua; M. Gakim; N. J. Siambun. (2022). Shredder machine for plastic recycling: A review paper. *Material and Energy Engineering for Sustainable Advancement (MEESA 2021)*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1217 012007. DOI:10.1088/1757-899X/1217/1/012007
9. S. Sarwar; M. Rahman Shaibur; F. Farzana; M. Howlader. (2024). Conversion of PP-type plastic caps to plastic rope and the instruments involved: Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 100882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cesce.2024.100882>
10. MAXTORMETAL. (2025, March 10). Selection of Materials for the Blades of Industrial Shredders [maxtormetal.com] : website. URL: <https://maxtormetal.com/choose-industrial-shredder-blade-material-extend-lifespan-maintenance-tips-tungsten-carbide-tool-steel-carbon-stainless/>
11. MAXTORMETAL. (2025, March 10). Comprehensive Analysis of Double-Shaft Shredders: website. URL: <https://maxtormetal.com/dual-shaft-shredders-blades-teeth-knife/>

Pavlo Yeromin, PhD tech. sci, **Andrii Kyrychenko**, Prof., DSc., **Andrii Hrechka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Anton Aparakin**, PhD tech. sci, **Evgen Nishchemenko**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Current Status and Development Prospects of Devices for Mechanical Crushing of 3D Printing Plastic Waste During its Recycling

The article discusses existing methods of shredding plastic waste, including mechanical shredding using shredders with disk blades. Three-dimensional design of rotating shafts assembled with knives for a mechanical shredder of ABS plastic waste is performed and various options for their implementation are analyzed. Ways of improving the design of the shredder's working chamber are proposed.

One of the promising areas for further development of mechanical shredders is the use of designs with replaceable knives, which allows, based on ready-made design solutions, to offer the consumer the most optimal equipment configuration in terms of the type of processed material, productivity, and type of working disk knives.

The advantages and disadvantages of replaceable cutting knives with different shapes of the central hole are considered.

Based on the research conducted, a diagram was proposed that depicts the main stages of designing a shredder with replaceable knives.

secondary recycling, plastic, mechanical grinding, shredder, knife geometry, 3D printing

Одержано (Received) 24.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 16.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025

А. М. Кириченко, проф., д-р техн. наук, О. О. Кропівний, М. Е. Амірсеїдов

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kiryuchenkoam@kntu.kr.ua

Просторова жорсткість робочого органа верстата з комбінованою кінематикою

У статті наведено теоретичні викладки для визначення матриці жорсткості робочого органа верстата на основі двохкоординатного механізму паралельної структури з ланками змінної довжини. Для визначення матриці жорсткості використано метод розкладення на прості пружини, згідно якого ланки механізму паралельної структури розглядаються як прості лінійні та крутильні пружини (або їх комбінації), а матриця жорсткості механізму паралельної структури визначається як поєднання матриць жорсткості усіх ланок-пружин.

просторова жорсткість, матриця жорсткості, механізм паралельної структури, верстат комбінованої структури

Постановка проблеми. Верстати з механізмами паралельної структури знайшли застосування в сучасному машинобудуванні для обробки деталей з легких сплавів, в авіаційній та автомобільній промисловості. Перспективним є створення верстатів комбінованої структури, які поєднують переваги звичайних верстатів та верстатів з механізмами паралельної структури. Верстат комбінованої структури на основі двохкоординатного механізму паралельної структури з ланками змінної довжини згідно [1] характеризується конструктивною простотою, можливістю використання для модернізації існуючих верстатів, відсутністю обмежень на довжину робочої зони. Оскільки просторова жорсткість механізмів паралельної структури визначає точність і продуктивність обробки, актуальною задачею є теоретичне визначення жорсткості верстата комбінованої структури на основі двохкоординатного механізму паралельної структури з ланками змінної довжини та визначення можливих шляхів її підвищення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні дослідження жорсткості обладнання з механізмами паралельної структури базуються на працях К. Gosselin [2, 3], D. Chakarov [4], G. Carbone [5] та інших дослідників.

Жорсткість твердого тіла визначається матрицею просторової жорсткості K розмірністю 6×6 , яка характеризує загальну жорсткість обладнання з паралельною кінематикою та яка встановлює зв'язок між величиною навантаження та переміщенням робочого органа під навантаженням [6, 7]

$$\mathbf{W} = \mathbf{K} \Delta \mathbf{S}. \quad (1)$$

Фізичний зміст елементів матриці жорсткості k_{ij} – жорсткість системи в напрямку i -ї узагальненої координати при дії j -ї компоненти узагальненого навантаження. Аналізу властивостей матриці жорсткості присвячені роботи [8, 9]. Аналіз та кількісне визначення характеристик жорсткості обладнання паралельної структури проводиться різними методами та підходами для різних кінематичних структур [10]. Зокрема, для механізмів паралельної структури з однорідними ланками доцільно використовувати метод матриці Якобі [6, 11], а для механізмів з різнорідними ланками можна використати метод розкладення на прості пружини [9], який полягає в тому, що робочий орган узагальненого верстата з механізмом паралельної структури, з'єднаний з основою верстата кількома активними чи пасивними ланками, можна

розглядати як тверде тіло, з'єднане з основою за допомогою кількох простих пружин (рис. 1).

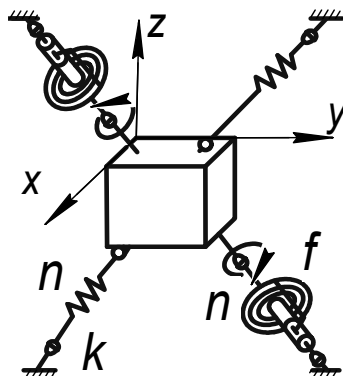


Рисунок 1 – Тіло, з'єднане з основою простими пружинами

Джерело: розроблено на підставі [9]

Тоді матриця жорсткості просторового механізму паралельної структури, у якому робочий орган з'єднано з основою кількома ланками, що зазнають лише стискання та розтяг, або передають обертальний момент, може бути визначена як поєднання матриць жорсткості ланок, які розглядаються як прості пружини [8]. Паралельному з'єднанню m ланок відповідає матриця жорсткості

$$K = \sum_{i=1}^m k_i \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^T, \quad (2)$$

де k_i – жорсткість i -ї пружини, $\mathbf{w}_i$ – шестивимірний вектор «закручування» i -ї пружини.

Для поступальних простих пружин

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} \\ \mathbf{r} \times \mathbf{n} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $\mathbf{n}$ – одиничний вектор, що задає напрямок пружини, $\mathbf{r}$ – вектор, що задає розташування довільної точки на лінії дії пружини.

Для виключно обертальних пружин закручування дорівнює

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{n} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де одиничний вектор $\mathbf{n}$ задає вісь обертання пружини.

Постановка завдання. Метою роботи є теоретичне визначення просторової жорсткості робочого органа верстата з двоохкоординатним механізмом паралельної структури з використанням методу розкладення механізму паралельної структури на прості пружини.

Виклад основного матеріалу. Компоновка верстата комбінованої структури на основі двоохкоординатного механізму паралельної структури з ланками змінної довжини зображена на рис. 2. Верстат складається з станини, вздовж якої здійснює координатне переміщення рухомий стіл, та жорсткої рами, яка несе шарнірні опори ланок змінної довжини механізму паралельної структури. Іншим кінцем ланки змінної довжини шарнірно закріплені до робочого органа верстата (шпиндельного вузла), який встановлений на поворотному паралелограмному механізмі, який служить для збереження постійної просторової орієнтації осі робочого органа.

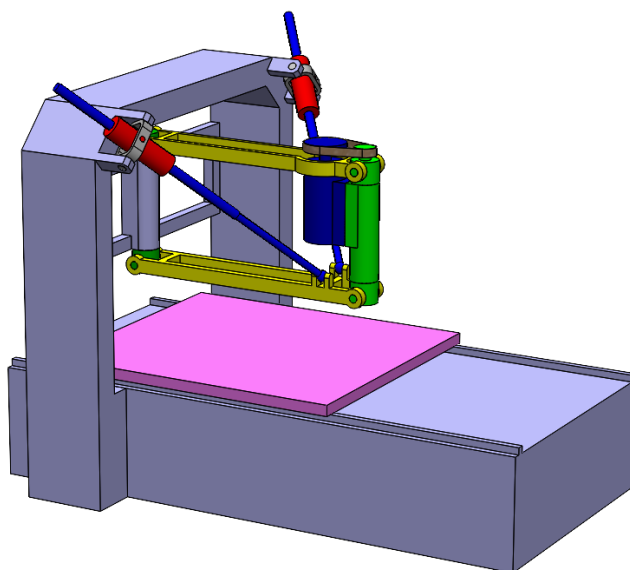


Рисунок 2 – Модель верстата з двохоординатним механізмом паралельної структури
Джерело: розроблено авторами

Зворотні кінематичні залежності верстата комбінованої структури на основі двохоординатного механізму паралельної структури теоретично визначено та проаналізовано у [11]. Довжина приводних ланок l_1 , l_2 визначається з геометричних співвідношень

$$l_1 = \begin{vmatrix} C - a \cos \theta \cos \psi - b \sin \theta - c \cos \theta \sin \psi \\ -B - a \sin \theta \cos \psi + b \cos \theta - c \sin \theta \sin \psi \\ H + a \sin \psi - c \cos \psi \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

$$l_2 = \begin{vmatrix} C - a \cos \theta \cos \psi + b \sin \theta - c \cos \theta \sin \psi \\ B - a \sin \theta \cos \psi - b \cos \theta - c \sin \theta \sin \psi \\ H + a \sin \psi - c \cos \psi \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (6)$$

де L – довжина робочого органа, B , C , H – координати розміщення шарнірів ланок змінної довжини на основі, a , b , c – координати розміщення шарнірів ланок змінної довжини на виконавчому органі, x , y , z – координати виконавчого органу у основній системі координат механізму, ψ , θ – кути повороту: $\sin \psi = -z/L$, $\sin \theta = y/L \cos \psi$.

Величина переміщення столу дорівнює

$$l_3 = L \cos \theta \cos \psi - x. \quad (7)$$

У наведеному механізмі паралельної структури штанги, окрім розтягування і стиснення, зазнають дії двох крутних моментів у взаємно перпендикулярних площинах, що можна відобразити схемою (рис. 3). Таким чином, матриця жорсткості робочого органа складається з матриць жорсткості K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 , K_6 , K_7 відповідно ланок O_1B_1 , O_2B_2 , AO , $A'O$, $A'A$ під час стиснення, кручення та обертання.

Для визначення матриці жорсткості згідно рівняння (3) необхідно для кожної ланки – простої пружини – визначити одиничний вектор n_i , що задає напрямок ланки (або вісь обертання) і шестивимірний вектор закручування w_i .

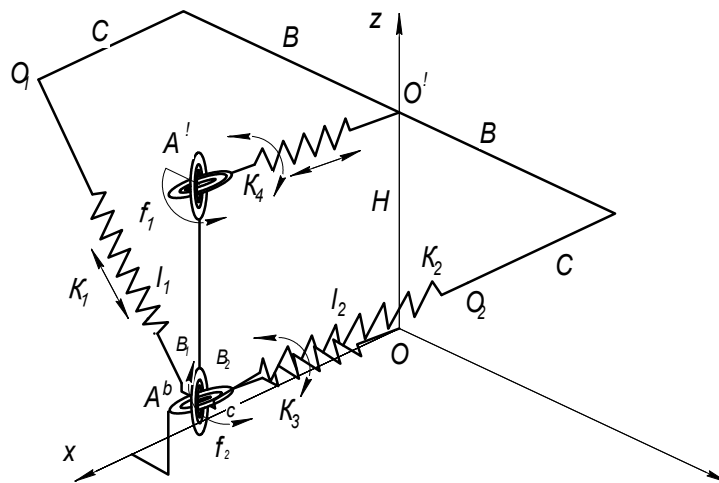


Рисунок 3 – Розрахункова схема двохкоординатного механізму паралельної структури
Джерело: розроблено авторами

Для ланки O_1B_1 вектор закручування

$$\mathbf{w}_{O_1B_1} = \begin{bmatrix} n_{O_1B_1} \\ r_{O_1B_1} \times n_{O_1B_1} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де $n_{O_1B_1}$ – одиничний вектор, який задає напрямок ланки O_1B_1

$$n_{O_1B_1} = \frac{\begin{pmatrix} C \\ -B \\ H \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a \cos \theta \cos \psi + b \sin \theta + c \cos \theta \sin \psi \\ a \sin \theta \cos \psi - b \cos \theta + c \sin \theta \sin \psi \\ -a \sin \psi + c \cos \psi \end{pmatrix}}{\left\| \begin{pmatrix} C - a \cos \theta \cos \psi - b \sin \theta - c \cos \theta \sin \psi \\ -B - a \sin \theta \cos \psi + b \cos \theta - c \sin \theta \sin \psi \\ H + a \sin \psi - c \cos \psi \end{pmatrix} \right\|}, \quad (9)$$

де r_{O_1}, r_{B_1} – радіус-вектори вершин O_1 та B_1 у системі координат основи,

$$r_{O_1} = \begin{pmatrix} C \\ -B \\ H \end{pmatrix} / \left\| \begin{pmatrix} C \\ -B \\ H \end{pmatrix} \right\|. \quad (10)$$

Тоді жорсткість ланки O_1B_1 :

$$K_1 = k_1 \cdot \mathbf{w}_{O_1B_1} \cdot \mathbf{w}_{O_1B_1}^T. \quad (11)$$

Для ланки O_2B_2 вектор закручування

$$\mathbf{w}_{O_2B_2} = \begin{bmatrix} n_{O_2B_2} \\ r_{O_2B_2} \times n_{O_2B_2} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де $n_{O_2B_2}$ – одиничний вектор, який задає напрямок ланки O_2B_2 ,

$$n_{O_2B_2} = |r_{O_2} - r_{B_2}| = \frac{\begin{pmatrix} C \\ B \\ H \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a \cos \theta \cos \psi - b \sin \theta + c \cos \theta \sin \psi \\ a \sin \theta \cos \psi + b \cos \theta + c \sin \theta \sin \psi \\ -a \sin \psi + c \cos \psi \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} C - a \cos \theta \cos \psi + b \sin \theta - c \cos \theta \sin \psi \\ B - a \sin \theta \cos \psi - b \cos \theta - c \sin \theta \sin \psi \\ H + a \sin \psi - c \cos \psi \end{pmatrix}}, \quad (13)$$

де r_{O_2}, r_{B_2} – радіус-вектори вершин O_2 та B_2 у системі координат основи.

$$r_{O_2} = \begin{pmatrix} C \\ B \\ H \end{pmatrix} / \left\| \begin{pmatrix} C \\ B \\ H \end{pmatrix} \right\|. \quad (14)$$

Тоді жорсткість ланки:

$$K_2 = k_2 \cdot \mathbf{w}_{O_2B_2} \cdot \mathbf{w}_{O_2B_2}^T. \quad (15)$$

Для ланки АО вектор закручування

$$\mathbf{w}_{AO} = \begin{bmatrix} n_{AO} \\ r_A \times n_{AO} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$r_A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Координати вершини А виконавчого органу в системі координат основи визначаються радіус-вектором:

$$n_{AO} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} / \left\| \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \right\|, \quad (18)$$

$$K_3 = k_3 \cdot \mathbf{w}_{AO} \cdot \mathbf{w}_{AO}^T. \quad (19)$$

Для ланки А'О вектор закручування

$$\mathbf{w}_{A'O} = \begin{bmatrix} n_{A'O} \\ r_{A'} \times n_{A'O} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$n_{A'} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{pmatrix} / \left\| \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{pmatrix} \right\|, \quad (21)$$

$$K_4 = k_4 \cdot \mathbf{w}_{A'O} \cdot \mathbf{w}_{A'O}^T. \quad (22)$$

Внаслідок дії моменту жорсткість ланок АО і А'О визначається як

$$\mathbf{w}f_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ r_A \times n_{AO} \end{bmatrix}, \mathbf{w}f_{1'} = \begin{bmatrix} 0 \\ r_{A'} \times n_{A'O} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$K_5 = f_1 \cdot \mathbf{w}f_1 \cdot \mathbf{w}f_1^T, \quad (24)$$

$$K_6 = f_1 \cdot \mathbf{w}f_{1'} \cdot \mathbf{w}f_{1'}^T \quad (25)$$

де $f_1, f_{1'}$ – коефіцієнти крутильної жорсткості ланок.

Для ланки A'A вектор закручування

$$\mathbf{w}_{A'A} = \begin{bmatrix} 0 \\ r_{A'} \times n_{A'A} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$n_{A'} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, r_{A'} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (27)$$

матриця жорсткості дорівнює

$$K_7 = f_2 \cdot \mathbf{w}_{A'A} \cdot \mathbf{w}_{A'A}^T \quad (28)$$

Тоді загальна матриця жорсткості механізму

$$K = \sum_{i=1}^7 K_i, \quad (29)$$

$$K = k_1 \cdot \mathbf{w}_{O1B1} \cdot \mathbf{w}_{O1B1}^T + k_2 \cdot \mathbf{w}_{O2B2} \cdot \mathbf{w}_{O2B2}^T + k_3 \cdot \mathbf{w}_{A0} \cdot \mathbf{w}_{A0}^T + k_4 \cdot \mathbf{w}_{A'0} \cdot \mathbf{w}_{A'0}^T + f_1 \cdot \mathbf{w}_{f1} \cdot \mathbf{w}_{f1}^T + f_1 \cdot \mathbf{w}_{f1'} \cdot \mathbf{w}_{f1'}^T + 2 \cdot f_2 \cdot \mathbf{w}_{A'A} \cdot \mathbf{w}_{A'A}^T. \quad (30)$$

Побудовані залежності координатної жорсткості від положення робочого органа по осі у показують, що максимальна поступальна жорсткість по осі Х спостерігається на осі симетрії верстата, тоді як жорсткість по осям Y та Z у цьому положенні мінімальна. І навпаки, наближення до країв робочої зони викликає зниження жорсткості по осі Х та підвищення жорсткості у напрямку осей Y та Z.

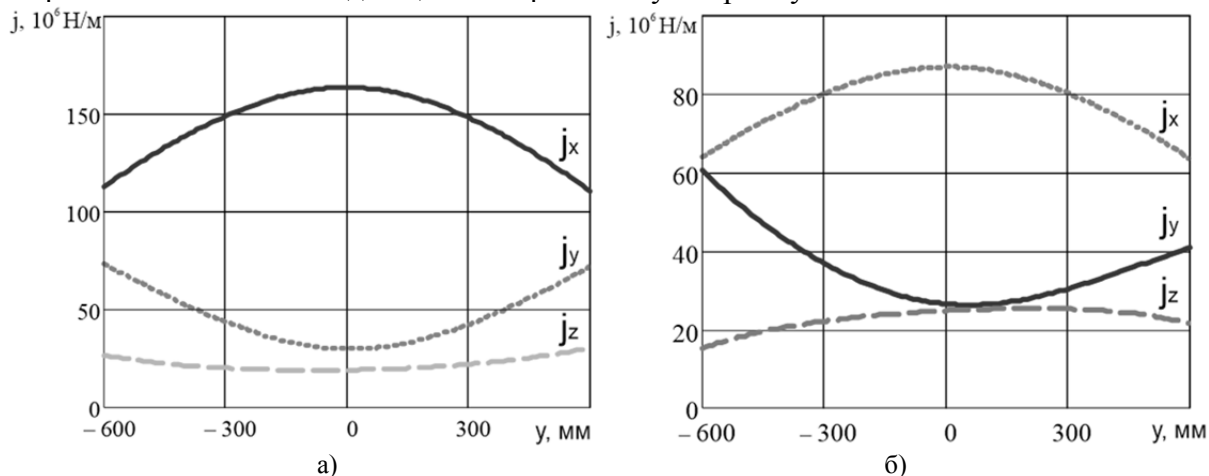


Рисунок 3 – Залежність а) поступальної, б) крутильної жорсткості від координати у робочого органа
Джерело: розроблено авторами

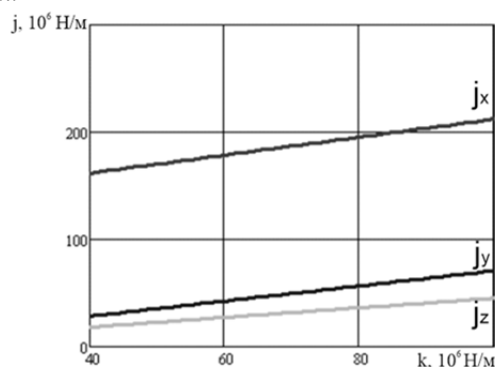


Рисунок 4 – Залежність поступальної жорсткості від жорсткості ланки змінної довжини
Джерело: розроблено авторами

Крутильна жорсткість відносно осі X також максимальна на осі симетрії і зменшується з наближенням до країв робочої зони, тоді як крутильна жорсткість відносно осі Y зростає, а крутильна жорсткість відносно осі Z залишається майже незмінною. Збільшення жорсткості ланок змінної довжини викликає пропорційне зростання координатної поступальної жорсткості робочого органа (рис. 4).

Висновки. Таким чином, на основі аналізу методів визначення матриці жорсткості механізмів паралельної структури застосовано метод розкладення на прості пружини і теоретично визначено матрицю жорсткості робочого органа верстата комбінованої кінематичної структури на основі двохкоординатного механізму паралельної структури з ланками змінної довжини. В результаті отримано аналітичні вирази для визначення матриці просторової жорсткості як функції геометричних параметрів механізму, координат положення робочого органа, а також поступальної та крутильної жорсткості ланок механізму. Встановлено залежність поступальної жорсткості вздовж координатних осей та крутильної жорсткості навколо координатних осей від положення робочого органа, а також вплив жорсткості ланок змінної довжини на координатну жорсткість робочого органа. Отримані результати стануть підґрунтям для оптимізації геометричних та структурних параметрів верстата на основі критеріїв жорсткості.

Список літератури

1. Верстат : Пат. на корисну модель 35361 Україна : МПК B23B 41/00. – № u200805562 ; заявл. 29.04.2008 ; опубл. 10.09.2008 ; Бюл. № 17.
2. Gosselin C., Zhang D. Stiffness analysis of parallel mechanisms using a lumped model. *International Journal of Robotics and Automation*. 2002. Vol. 17(1). P. 17-27.
3. Quennouelle C., Gosselin C. Stiffness Matrix of Compliant Parallel Mechanisms. *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design. Part 5*. Springer Netherlands, 2008. P. 331-341.
4. Chakarov D. Approaches of Stiffness Control of Parallel Manipulators with Actuation Redundancy. *Proc. of the International Scientific Conference PRACTRO'03, Yune 10-13*. Varna, 2003. P. 199-206.
5. Carbone G., Ceccarelli M. Comparison of indices for stiffness performance evaluation. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*. 2010. No 5. P. 270-278. <https://doi.org/10.1007/s11465-010-0023-z>.
6. Кириченко А.М., Струтинський В.Б. Просторова жорсткість обладнання з паралельною кінематикою. *Вісник ЖДТУ*. 2010. №8. С. 88-97.
7. Струтинський В. Б., Кириченко А. М. Математичний апарат векторів шостого порядку для розрахунків жорсткості просторових механізмів паралельної структури. *Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки»*. Суми : СумДУ, 2010. № 2. С. 142-154.
8. Huang S., Schimmels J. M. The eigenscrew decomposition of spatial stiffness matrices. *IEEE Trans. Robotics Automation*. 2000. Vol. 6, No. 2. P. 146-156.
9. Кириченко А. М. Матриця жорсткості просторових механізмів паралельної структури з пружними ланками. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* Кіровоград: КНТУ, 2010. Вип. 40, ч. 1. С. 256-262.
10. Gonçalves R., Carbone G., Carvalho J., Ceccarelli M. (2016). A comparison of stiffness analysis methods for robotic systems. *International journal of mechanics and control*. 2016. 17 (2), 35-58.
11. Hoveenaars A.G., Lambert P., Herder J.L. Jacobian-based stiffness analysis method for parallel manipulators with non-redundant legs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2015; 230(3):341-352. doi:10.1177/0954406215602283
12. Кириченко А. М., Ленченко Л. В., Заїка А. М. Аналіз кінематики верстата з двохкоординатним механізмом паралельної структури «біпод». *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль : ТДТУ, 2008. № 2. С. 74-81.

References

1. Machine Tool : Pat. 35361 Ukraine : IPC B23B 41/00. No u200805562 ; filed 29.04.2008 ; published 10.09.2008 ; Bulletin No 17. [in Ukrainian]
2. Gosselin, C. & Zhang D. (2002) Stiffness analysis of parallel mechanisms using a lumped model.

- International Journal of Robotics and Automation*, 17(1), 17-27.
3. Quennouelle, C., & Gosselin, C. (2008). Stiffness matrix of compliant parallel mechanisms. In J. Lenarčič & P. Wenger (Eds.), *Advances in robot kinematics: Analysis and design* (pp. 331–341). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8600-7_34
 4. Chakarov, D. (2003). Approaches of stiffness control of parallel manipulators with actuation redundancy. In *Proceedings of the International Scientific Conference PRACTRO'03* (pp. 199–206). Varna, Bulgaria.
 5. Carbone, G., Ceccarelli, M. (2010) Comparison of indices for stiffness performance evaluation. *Front. Mech. Eng. China*, (5), 270–278. <https://doi.org/10.1007/s11465-010-0023-z>.
 6. Kyrychenko, A. M., & Strutynskyi, V. B. (2010). Spatial stiffness of equipment with parallel kinematics. *Bulletin of ZhDTU*, (8), 88–97. [in Ukrainian]
 7. Strutynskyi, V. B., & Kyrychenko, A. M. (2010). Mathematical apparatus of sixth-order vectors for calculating the stiffness of spatial parallel manipulators. *Bulletin of Sumy State University, Technical Sciences Series*, (2), 142–154. [in Ukrainian]
 8. Huang, S., & Schimmels, J. M. (2000). The eigenscrew decomposition of spatial stiffness matrices. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(2), 146–156. <https://doi.org/10.1109/70.843171>
 9. Kyrychenko, A. M. (2010). Stiffness matrix of spatial mechanisms with parallel structure and elastic links. *Design, Manufacturing, and Operation of Agricultural Machinery: National Interdepartmental Scientific and Technical Collection*. 40(1), 256–262. Kirovohrad: KNTU. [in Ukrainian]
 10. Gonçalves R., Carbone G, Carvalho J. & Ceccarelli M. (2016). A comparison of stiffness analysis methods for robotic systems. *International journal of mechanics and control*, 17 (2), 35–58.
 11. Hoevenaars, A. G., Lambert, P., & Herder, J. L. (2016). Jacobian-based stiffness analysis method for parallel manipulators with non-redundant legs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 230(3), 341–352. <https://doi.org/10.1177/0954406215602283>
 12. Kyrychenko, A. M., Lenchenko, L. V., & Zaika, A. M. (2008). Analysis of the kinematics of a machine tool with a two-coordinate parallel structure mechanism “bipode”. *Bulletin of Ternopil State Technical University*, (2), 74–81 [in Ukrainian].

Andrii Kyrychenko, Prof., Dr. Tech. Sc., **Mahomed Amirseidov**, **Oleksandr Kropivny**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Spatial Stiffness of the End Effector of a Machine Tool with Combined Kinematics

The article presents theoretical formulations for determining the stiffness matrix of the end effector of a machine tool with combined kinematics based on a 2-dof parallel manipulator with variable-length links. The stiffness matrix is determined using the simple spring decomposition method, wherein the links of the parallel structure mechanism are modeled as simple linear and torsional springs (or their combinations).

The end effector of the machine tool with a 2-dof parallel manipulator, connected to the machine base by several active or passive links, is represented as a rigid body linked to the base through multiple simple springs with known linear or torsional stiffness. The stiffness matrix of the spatial parallel manipulator with the end effector connected to the base by multiple links subjected only to compression and tension or transmitting rotational torque, can be determined as a combination of the stiffness matrices of the links, treated as simple springs. The geometric parameters required for calculating the stiffness matrices of individual links — namely, the link axis vectors and the coordinates of their endpoints — are obtained using the inverse kinematics of the manipulator.

As a result, analytical expressions are derived for determining the spatial stiffness matrix as a function of the mechanism's geometric parameters, the position coordinates of the end effector, and the translational and torsional stiffness of the mechanism's links. The dependence of translational stiffness along the coordinate axes and torsional stiffness about the coordinate axes on the position of the end effector, as well as the influence of the stiffness of variable-length links on the coordinate stiffness of the end effector, are established. These findings provide a tool for optimizing the geometric and structural parameters of machine tool based on stiffness criteria.

spatial stiffness, stiffness matrix, parallel manipulator, machine tool with combined kinematics

Одержано (Received) 15.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.05.2025

Bohdan Tsymbal^{1,2}, Assoc. Prof., D.P.A., **Nataliya Karyavkina²**¹*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine*²*LLC "Technical University "Metinvest Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine**e-mail: tsembalbogdan@ukr.net*

Modernisation of Foundry Production with Industrial Robots and Manipulators

The modernization of foundry production through industrial robots and manipulators represents a significant advancement in automation, efficiency, and occupational safety. The foundry industry plays a crucial role in the manufacturing sector, providing high-quality metal products for various applications. However, traditional foundry processes are often labor-intensive, hazardous, and prone to inefficiencies. In recent years, the integration of robotics and automated technologies has become an essential aspect of improving productivity, ensuring precision, and enhancing workplace safety. This study focuses on the application of industrial drones in foundry production, particularly for material transportation, coating application, and quality control. The research explores the feasibility of integrating the DJI Matrice 300 RTK drone into the casting process, analyzing its potential benefits in optimizing logistics, minimizing defects, and improving overall process efficiency. The use of drones in foundry operations offers several advantages, including the ability to operate in high-temperature environments, automate routine tasks, and reduce human exposure to hazardous conditions. To achieve these objectives, the study employs a combination of theoretical analysis, mathematical modeling, and experimental testing. A mathematical model of drone movement within the foundry environment is developed to optimize flight paths, minimize energy consumption, and ensure precise navigation. Additionally, simulations are conducted to assess the impact of high temperatures and airborne particles on drone performance. Experimental trials are carried out in real production conditions to validate the proposed approach and evaluate the efficiency of drone-assisted operations. The results of the study indicate that industrial drones can significantly improve foundry logistics by reducing material transportation time and ensuring the precise application of protective coatings. The implementation of automated aerial systems enhances quality control by enabling real-time monitoring of casting processes and early defect detection. Moreover, the reduction of human involvement in hazardous tasks contributes to workplace safety and minimizes occupational risks. Based on the findings, recommendations are proposed for optimizing the integration of drones into foundry production. These include refining navigation algorithms, enhancing thermal protection measures, and developing advanced sensor technologies for improved defect detection. The implementation of these recommendations can lead to higher efficiency, reduced waste, and increased competitiveness in the foundry industry. The study's outcomes have been applied in practical settings, including their adoption at PJSC "Kamet Stal" and incorporation into educational programs to enhance training in industrial automation. The research highlights the transformative potential of drone technology in modernizing foundry production and underscores the importance of continued innovation in automation and robotics. Future research directions include exploring alternative energy sources for drones, improving their adaptability to extreme environmental conditions, and expanding their functionality for broader industrial applications.

automation, foundry production, industrial drones, modernization, robotics, Industry 4.0, occupational safety

Statement of the problem. Foundry is one of the examples of efficient use of resources, as castings are almost completely recyclable. After completing their “life” cycle, they are subject to remelting. In addition, modern technologies make it possible to recover up to 95% of the sand mixture for the manufacture of various casting molds, which has a positive impact on the environment [1]. One of the important areas of automation and improving energy efficiency is the introduction of robotization [2].

The foundry industry is undergoing significant transformations due to the emergence of automation and robotics. This revolution not only increases efficiency and productivity, but also improves safety and quality in the sector. The integration of automation and robotics into foundry processes is changing the situation dramatically. Traditionally, foundry processes have been labor-intensive, involving a high level of manual labor. Workers have to perform

tasks such as molding and casting, often in hazardous conditions. However, the introduction of automation and robotics is changing this process.

Analysis of recent research and publications. Foundries, historically labor-intensive and dangerous, have evolved in parallel with technological progress. In the early days, workers manually handled high-temperature molten metal and performed physically demanding tasks. This led to significant risk safety and potential inconsistency in casting quality. However, as the Industrial Revolution progressed, mechanization and automation.

Among the different types of robots, automated industrial robots are in the greatest demand. Robotic systems of the near future will allow replacing humans in most of the main and auxiliary production operations, contributing to the automation of technological processes in various industrial sectors. This is especially true for the foundry and metallurgical industry, where there are dangerous and harmful working conditions, in particular in hot shops [3-5].

The technology of casting by gasified patterns (LGM) with the use of robotic systems [4] includes the use of a thermal furnace with a rotating hearth manufactured by CAN-ENG Furnaces International Limited (USA). The robot loads the furnace with castings in three rows, which optimizes the heat treatment of aluminum products at a temperature of 500-550 °C. These furnaces are also suitable for isothermal holding of iron-carbon alloys in the range of 350-450 °C. Similar systems are used in foundry RCC schemes [6].

There is a robotic wafer transfer system, which is an innovative equipment for foundry production. This system includes a 4 DOF robotic arm to transfer wafers between the cassette and the processing chambers. It has intelligent automation for wafer manufacturing, in which multiple wafers and chambers need to be processed simultaneously. The robotic system integrates defect detection and wafer processing endpoint determination [7].

A robot is an automated machine designed to reproduce human motor and intellectual functions. Manipulator robots that perform universal tasks are equipped with executive manipulator devices (mechanical arms) [8].

Increasing the payload of robotic systems for foundry operations contributes to the optimization of production cycles compared to traditional casting methods, which is a major factor in the growth of the foundry robotics market. The introduction of technological innovations aimed at reducing the time of integration of robots into the casting process and expanding their functionality is also a key factor stimulating the demand for such solutions [8].

The development of the foundry robotics market is constrained by the difficulty of protecting exposed drives of robotic systems from dust and liquids. At the same time, optimizing production costs and classifying casting methods into four main categories - sand casting, injection molding, gravity casting and LGM - remain key aspects of the industry.

Let us consider examples of the latest technical solutions that demonstrate the interaction of people and cobots, as implemented in the case of Kuka and ABB robotic systems [9]. In foundry production, such an implementation is most appropriate for precision, large-scale and mass casting operations. The ideal option is to combine human advantages (flexibility, subjectivity of decisions, creativity, experience, intuition, wide overview) with the advantages of robotic systems (automation, high accuracy, power), which contributes to the effective distribution of tasks and an increase in overall productivity.

Sand casting is widely used to manufacture components such as engine mounts and differential housings. Once cast, these parts undergo precise cutting and grinding, performed by an industrial robot – specifically, the IRB 6660 ABB – within an automated production cell developed by Automations Robotic GmbH. In this process, an operator secures the raw workpiece in a specialized positioner, which then transfers it into the robotic cell for machining. After the robotic processing is completed, the component is moved to the next workstation for further operations [10].

By adjusting the robot's speed under high force conditions, force control technology minimizes the risk of part damage or machining errors while also preserving tool integrity. This approach extends the lifespan of cutting tools, enhances spindle durability, and improves the precision of the robot's axes. Furthermore, the implementation of this technology results in a 20% reduction in cycle time, increasing overall production efficiency [10].

The industrial robotic casting process consists of multiple stages, including molding, additional processing, and cold working. At the molding phase, robots precisely shape the sand core using intelligent automation. In the post-processing stage, automated systems refine the rough casting with high accuracy. Finally, the cold processing phase integrates robotic deburring, chamfering, cleaning, and air-blowing to enhance the overall quality and consistency of the final product [11].

TIE Industrial's selection of robots for foundry production includes models known for their durability and performance: The Fanuc M-2000 iA is known for its exceptional load capacity and reach, which making it ideal for handling large castings and complex tasks; ABB IRB 7600 provides robust design and versatile performance, suitable for a variety of foundry applications, from casting to finishing; KUKA KR QUANTEC F series are designed specifically for foundry production, these robots provide high resistance to heat and contamination; Motoman ES 165 D is characterized by high speed and precision, ideal for finishing and efficient work with small castings [1].

Despite significant achievements in the field of automation of foundry production, a number of scientific questions remain open that require further research, one of which is the integration of flying robots into the production cycle - studying the possibilities of using drones not only for monitoring, but also for active intervention in the production process, for example, transporting materials or applying coatings.

Setting the task. The purpose of the scientific work is to evaluate the effectiveness of integrating the DJI Matrice 300 RTK drone into the casting technological cycle to improve the productivity, quality, and safety of production processes. To achieve this goal, the following research tasks were defined: conducting an analysis of the possibilities of using industrial drones in foundry production, developing a mathematical model of drone movement in a production environment, studying the impact of high temperatures on the operational characteristics of the drone, assessing the efficiency of material transportation, coating application and quality control using a drone, performing experimental tests and summarizing the results to determine optimal operating modes and develop recommendations.

Presentation of the main material. The use of drones in foundry production opens up new opportunities for automation and efficiency of technological processes. The main scenarios of their application include material transportation, coating application and product quality control.

One key scenario involves transporting materials between different production sections. A drone can move small batches of sand mixtures, chemical reagents or auxiliary components, which allows to reduce delivery delays and optimize logistics operations. With autonomous control and precise positioning systems such as GPS, RTK and LiDAR, drones can quickly and safely deliver materials to specific points in the production process.

Another scenario involves applying coatings to metal workpieces before or after the casting process. A drone equipped with spraying systems can evenly apply anti-corrosion or heat-resistant coatings to parts. This improves product quality, reduces material waste, and minimizes human intervention in the process. Automation of coating also helps reduce defects, improving the final product.

Quality control is another promising area of drone use in foundry production. Drones equipped with high-precision cameras, thermal imagers and spectrometers can perform non-contact monitoring of the condition of molds and finished products. They are able to detect casting defects, assess the uniformity of metal cooling and transmit the collected data in real

time to quality management systems. This allows for timely detection of problems and prompt correction of the production process, which helps to reduce the number of scrap and increase overall production efficiency.

Thus, the integration of drones into foundry production allows improving logistics processes, automating coating applications, and ensuring quality control of finished products. The use of such technologies contributes to increasing productivity, reducing production costs, and improving working conditions.

Mathematical modeling allows analyzing drone trajectories, their interaction with the foundry environment, and estimating energy consumption during production tasks. This study examines the use of the DJI Matrice 300 RTK unmanned aerial vehicle for material transportation, coating, and quality control in foundry production.

Kinematic analysis of the drone trajectory. The drone motion is described by the kinematic equations according to Newton's second law [12]:

$$x(t) = x_0 + v_x t + \frac{1}{2} a_x t^2 \quad (1)$$

$$y(t) = y_0 + v_y t + \frac{1}{2} a_y t^2 \quad (2)$$

$$z(t) = z_0 + v_z t + \frac{1}{2} a_z t^2 \quad (3)$$

where $x_0 = 2$ m, $y_0 = 1$ m, $z_0 = 5$ m – initial coordinates of the drone; $v_x = 3$ m/s, $v_y = 2$ m/s, $v_z = 1.5$ m/s – initial velocities; $a_x = 0.5$ m/s², $a_y = 0.3$ m/s², $a_z = 0.2$ m/s² – acceleration.

The dynamics of the drone's motion is determined by the Lagrange equation of the second kind [13]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (4)$$

where L is the Lagrangian of the system, q is the generalized coordinates, and Q is the generalized forces.

The drone is used to transport small batches of sand mixtures, low-melting metals and auxiliary materials between working areas of the foundry. Thanks to precise navigation (RTK GPS), stable movement is ensured even in closed rooms. Taking into account the drone's payload capacity (up to 2.7 kg), the route is optimized to minimize energy consumption. The optimal flight trajectory is modeled using a dynamic programming algorithm [14], which allows determining the most economical route taking into account air flows and temperature differences.

The drone is equipped with spraying systems for applying anti-corrosion, heat-resistant or protective coatings to metal parts. The uniformity of the spray is taken into account, which is modeled by the flow equation:

$$Q_s = \frac{m}{t} = \rho V \quad (5)$$

where m is the mass of the coating, t is the application time, ρ is the density of the material, V is the spray volume.

To improve spray accuracy, the Navier-Stokes turbulent flow model [15] is used, which allows predicting the direction and uniformity of the coating under variable temperature conditions.

The drone is equipped with high-precision cameras and thermal imagers to monitor the condition of castings and detect defects. Spectral analysis is used to assess deviations from standard parameters. The optical analysis system is based on machine learning methods [16], which allows for automatic classification of defects by their nature and degree of criticality.

The foundry environment is characterized by high temperatures, strong electromagnetic interference, and the presence of metal obstacles that can affect the drone's navigation systems. The temperature effect is taken into account through the thermal radiation coefficient:

$$Q = \sigma \varepsilon A (T_s^4 - T_e^4) \quad (6)$$

where $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ – Stefan-Boltzmann constant; $\varepsilon = 0.85$ – emissivity of the drone surface; $A = 0.2 \text{ m}^2$ – drone surface area; $T_s = 1200 \text{ K}$ – foundry furnace temperature; $T_e = 300 \text{ K}$ is the ambient temperature.

A series of experimental studies were conducted to evaluate the effectiveness of using the DJI Matrice 300 RTK unmanned aerial vehicle in foundry production. The main areas of evaluation were material transportation, application of protective coatings, and product quality control in conditions of elevated temperatures and polluted environments.

Experimental tests were conducted in the production workshops of the foundry, where the drone's performance was evaluated according to several key criteria. First, the speed of material transportation was analyzed, that is, the time required to deliver the cargo to a given distance. Second, the accuracy of coating application was checked, where the uniformity of material spraying on metal surfaces was assessed. Casting quality control was also checked, which included the detection of defects using cameras and thermal imagers. In addition, energy consumption was measured to assess the battery life and overall energy consumption of the device. The last criterion was the drone's resistance to the influence of the foundry environment, including high temperature and increased concentration of metal dust.

During testing, the DJI Matrice 300 RTK drone was found to be capable of transporting loads such as sand mixtures and auxiliary materials over a distance of 50 meters in an average of 18 seconds. Using a load of up to 2.5 kg had little effect on flight speed, while increasing the weight to 2.7 kg resulted in a 15% decrease in efficiency. The results indicate that the drone can be effectively used for transportation operations within the foundry, however, the recommended load weight should not exceed 2.5 kg to maintain flight stability.

Experiments with coating application showed high accuracy of the spraying system. The uniformity of the coating deviated by no more than $\pm 5\%$ from the specified thickness at a flight speed of 1 m/s. At the same time, conditions of high humidity and high temperature up to 800°C did not affect the quality of the application. However, effective coating application in such conditions required the use of special heat-resistant paints and stabilization of the drone to minimize deviations in the spraying trajectory.

Quality control of foundry castings using a drone has shown high efficiency in detecting defects. The thermal imaging system allowed to identify 90% of surface cracks, the size of which exceeded 0.5 mm. However, for a deeper analysis of defects, it is recommended to use additional infrared sensors that can detect hidden internal damage to parts.

Energy consumption assessment showed that the maximum autonomous operation time of the drone without load was 45 minutes, while when carrying a load of 2.5 kg, it decreased to 35 minutes. In addition, when operating at elevated temperatures above 700°C , the drone's energy consumption increased by 25%, indicating the need to develop more efficient cooling systems for onboard electronic components.

To visually present the results obtained, dependence graphs were constructed. The first graph demonstrates the change in transportation time depending on the mass of the cargo (Fig. 1.a). It was found that with an increase in mass above 2.5 kg, the transportation time increases significantly, which confirms the efficiency of the drone in conditions of limited load capacity. The second and third graphs show the relationship between the mass of the cargo and the time of autonomous operation of the drone, as well as the influence of the ambient temperature on energy consumption (Fig. 1.b and Fig. 1.c). The optimal value of the mass of 2.5 kg turned out to be, at which an acceptable balance between energy consumption and flight time is maintained. In addition, it was determined that at a temperature of 700 K ,

the energy consumption of the drone increases to 125%, which indicates the need for additional measures to cool the electronic systems.

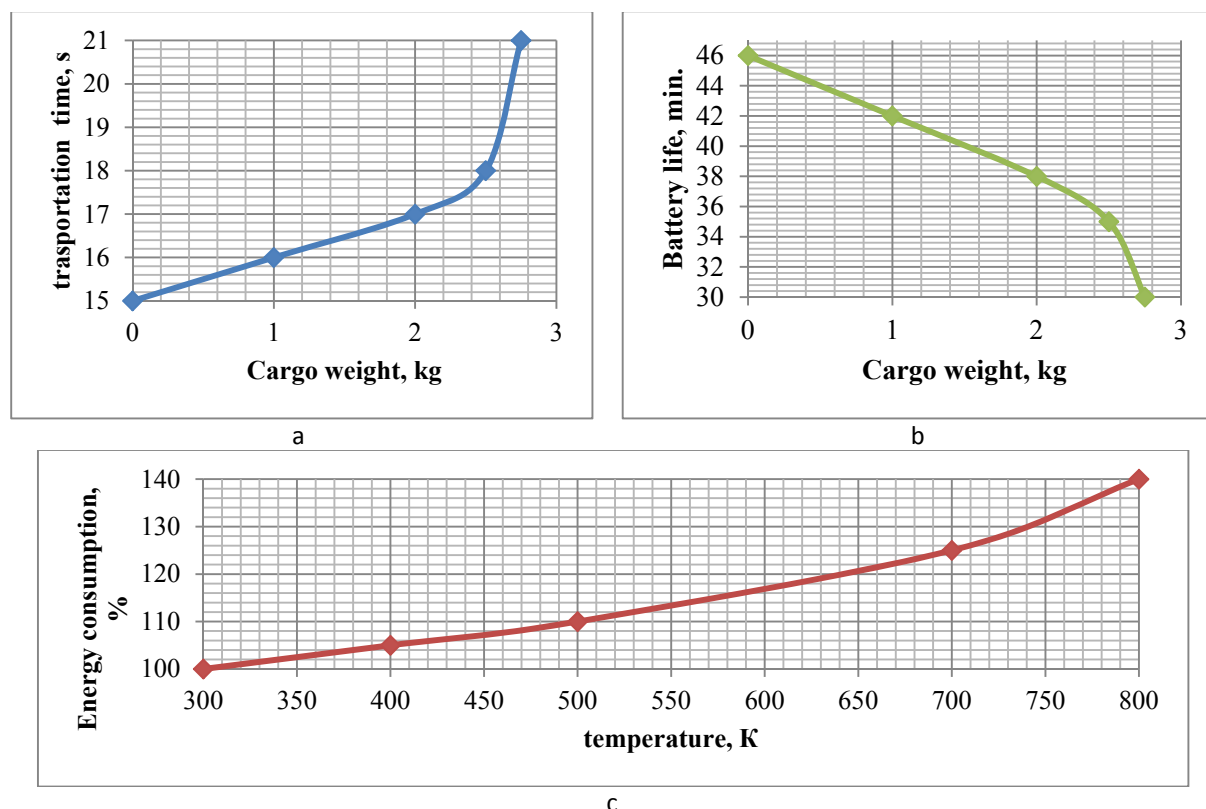


Figure 1 – Graphs of dependences: a - transportation time on cargo mass, b - autonomous operation time on cargo mass and c - energy consumption and temperature

Source: developed by the authors.

In general, experimental studies have confirmed the effectiveness of using the DJI Matrice 300 RTK drone in foundry production. The optimal payload should not exceed 2.5 kg, which ensures maximum stability and efficiency of work. The speed of transportation and accuracy of coating application meet production requirements, and the use of thermal imagers significantly improves the quality of casting control. The impact of high temperatures requires further research to develop additional cooling systems and increase the thermal resistance of electronic components. In the future, it is also advisable to optimize the aerodynamics of the drone to improve flight stability and expand its functionality in difficult industrial conditions.

Conclusions. The study achieved its goal – the effectiveness of integrating the DJI Matrice 300 RTK drone into the casting process cycle was assessed to improve productivity, quality, and safety of production processes. The analysis of the possibilities of using industrial drones in foundry production allowed us to identify their main advantages and limitations. The use of drones helps to increase the efficiency of material transportation, quality control, and coating.

The developed mathematical model allows predicting the trajectory of the drone, taking into account changes in the workshop. The impact of high temperatures on operational characteristics was studied, which allowed determining critical limits and measures to improve thermal resistance.

The effectiveness of drones in production processes was assessed. It was found that their use reduces logistics costs, minimizes the risk of injuries and increases the accuracy of operations. Technical challenges associated with the effects of temperatures, metal dust and

electromagnetic interference were identified, which requires additional solutions for thermal protection, navigation and structural stability.

The results obtained have been implemented in production and in the educational process, which confirms their practical significance. Further research can be aimed at improving autonomous control, sensor systems, and integrating drones into automated production processes.

List of References

1. Doroshenko V., Yanchenko O. Improving the resource efficiency of foundry due to the assembly of conveyor and rotor-conveyor lines by robots. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*. 2020. Vol. 27. № 2. P. 179–186. DOI: 10.31649/2311-1429-2019-2-179-186
2. Дорошенко В. С. Метод нейтралізації газів, що виділяються з ливарної форми при литві за газифікованими моделями. *Ливарне виробництво*. 2021. № 9. С. 8-14.
3. Дорошенко В.С. Комплектація роботами конвеєрних та роторно-конвеєрних ліній ливарного виробництва. *Лиття України*. 2019. № 6. С. 21-23.
4. Дорошенко, В.С. Лиття по газифікованих моделях з кристалізацією металу під тиском. *Ливарне виробництво*. 2016. № 1. С. 25-28.
5. Калюжний П. Б., Бродовий О. В., Дорошенко В. С., Нейма О. В. 3d-генерація пористих структур для друку ливарних моделей, що газифікуються в ливарній формі. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні (Праці Міжнародної науково-технічної конференції)*. 2024. № 5. DOI: 10.20535/2519-450x.5.2024.319032
6. Дорошенко В. С. Концепція роторно-конвеєрного комплексу для літа по газифікованим моделям і термообробки відливок. *Металл и литье Украины*. 2019. № 1-2. С. 31-40. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001001769>
7. Song K.-T., Ou S.-Q., Yang C.-A., Sun Y.-X., Kang L.-R., Wang Z.-Y., Wang Y.-S., Lu P.-C., Ko C.-L., Chen Y. H. Scheduling and control of a wafer transfer robot for foundry equipment innovation competition. *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. № 15. P. 627–632. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.654
8. Калюжний П.Б., Шинський О.Й., Дорошенко В.С. Удосконалення ступінчастої ливникової системи для лиття за моделями, що газифікуються. *Литво. Металургія. 2024 : Матеріали XX Ювіл. Міжнар. науково-практ. конф., м. Харків, 30 трав. 2024 р. Харків. 2024. С. 123–126. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79750>*
9. Kaliuzhnyi P., Doroshenko V., Neima O. Casting of combined polymer patterns that are gasified. Casting processes. 2023. Vol. 152. № 2. P. 49–55. DOI: 10.15407/plit2023.02.049
10. ABB Robotics magazine. *International customer magazine from ABB Robotics*. 2015. № 2. Publisher: ABB Robotics AB. URL: <https://surl.li/wvzrjm>
11. Yang, Y., Zheng, Y., Xu, Y., Yang, M., Boyang, B., & Liu, F. Robotic applications of foundry industry in china. *У Proceedings of the 72nd world foundry congress*. 21-25th May 2016. Nagoya. URL: <https://www.senkyo.co.jp/shishido/wfc2016/pdf/O-153.pdf>
12. Lynch K. M., Park F. C. *Modern robotics: mechanics, planning and control*. Cambridge University Press, 2017. 544 p. URL: <http://modernrobotics.org>
13. Goldstein H., Poole C., Safko J., *Classical Mechanics*, Addison-Wesley, 2002. URL: <https://surl.li/mrdeyr>
14. Bertsekas D., *Dynamic Programming and Optimal Control*, Athena Scientific, 2012. URL: <https://surl.li/srkwvtv>
15. Batchelor G. K., *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press. 2000. DOI: 10.1017/CBO978051180095
16. Heaton I., Goodfellow J. Ian, Bengio Y., Courville A.: *Deep learning. Genetic programming and evolvable machines*. 2017. Vol. 19, № 1-2. P. 305–307. URL: DOI: 10.1007/s10710-017-9314-z

References

1. Doroshenko, V., & Yanchenko, O. (2020). Improving the resource efficiency of foundry due to the assembly of conveyor and rotor-conveyor lines by robots. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*, 27(2), 179–186. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-179-186>
2. Doroshenko, V.S. (2021). Metod neutralizatsii haziv, shcho vydiliaiutsia z lyvarnoi formy pry lytvi za hazifikovanyimi modeliami. *Lyvarne vyrobnytstvo*, (9), 8–14 [in Ukrainian].
3. Doroshenko, V.S. (2019). Komplektatsiia robotamy konveiernykh ta rotorno-konveiernykh liniy lyvarnoho vyrobnytstva. *Lyttia Ukrainy*, (6), 21–23 [in Ukrainian].
4. Doroshenko, V.S. (2016). Lyttia po hazifikovanykh modeliakh z krystalizatsiieiu metalu pid tyskom. *Lyvarne vyrobnytstvo*, (1), 25–28 [in Ukrainian].
5. Kaliuzhnyi, P.B., Brodovyi, O.V., Doroshenko, V.S., & Neima, O.V. (2024). 3D-heneratsiia porystykh struktur dlia drukuvannia lyvarnykh modeli, shcho hazifikuiutsia v lyvarnii formi. *Novi materialy i tekhnologii v mashynobuduvanni*, (5). <https://doi.org/10.20535/2519-450x.5.2024.319032> [in Ukrainian].

6. Doroshenko, V.S. (2019). Kontsepsiia rotorno-konveiiernoho kompleksu dlia lytia po hazifikovanykh modeliakh i termoobrobotsky viddlivok. *Metall i lytie Ukrainy*, (1–2), 31–40. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001001769> [in Ukrainian].
7. Song, K.-T., Ou, S.-Q., Yang, C.-A., Sun, Y.-X., Kang, L.-R., Wang, Z.-Y., Wang, Y.-S., Lu, P.-C., Ko, C.-L., & Chen, Y.H. (2019). Scheduling and control of a wafer transfer robot for foundry equipment innovation competition. *IFAC-PapersOnLine*, 52(15), 627–632. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.654>
8. Kaliuzhnyi, P.B., Shynskiy, O.Yi., & Doroshenko, V.S. (2024). Udoskonalennia stupinchastoi lyvnykovoi systemy dlia lytia za modeliami, shcho hazifikuiutsia. In *Lytvo. Metalurhiia: Materialy XX Yuvileinoi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, Kharkiv, 30 travnia 2024 (pp. 123–126). <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79750> [in Ukrainian].
9. Kaliuzhnyi, P., Doroshenko, V., & Neima, O. (2023). Casting of combined polymer patterns that are gasified. *Casting Processes*, 152(2), 49–55. <https://doi.org/10.15407/plit2023.02.049>
10. ABB Robotics AB. (2015). *ABB Robotics Magazine. International customer magazine*, (2). <https://surl.li/wvzrjm>
11. Yang, Y., Zheng, Y., Xu, Y., Yang, M., Boyang, B., & Liu, F. (2016). Robotic applications of foundry industry in China. In *Proceedings of the 72nd World Foundry Congress*, May 21–25, 2016, Nagoya. <https://www.senkyo.co.jp/shishido/wfc2016/pdf/O-153.pdf>
12. Lynch, K.M., & Park, F.C. (2017). *Modern robotics: Mechanics, planning and control*. Cambridge: Cambridge University Press. <http://modernrobotics.org>
13. Goldstein, H., Poole, C., & Safko, J. (2002). *Classical mechanics*. Addison-Wesley. <https://surl.li/mrdcyr>
14. Bertsekas, D. (2012). *Dynamic programming and optimal control*. Athena Scientific. <https://surl.li/srkwty>
15. Batchelor, G.K. (2000). *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO978051180095>
16. Heaton, I., Goodfellow, J., Ian, Y., Bengio, Y., & Courville, A. (2017). Deep learning. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 19(1–2), 305–307. <https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z>

В. М. Цимбал^{1,2}, доц., д-р держ. упр., **Н. С. Карявкіна**²

¹Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

²ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Модернізація ливарного виробництва промисловими роботами та маніпуляторами

Метою даного дослідження є оцінка ефективності інтеграції промислових дронів у ливарне виробництво для підвищення рівня автоматизації, продуктивності та безпеки праці. Робота зосереджена на використанні безпілотного літального апарата DJI Matrice 300 RTK для транспортування матеріалів, нанесення захисних покриттів та контролю якості в складних умовах ливарного виробництва. Основним завданням є визначення впливу дронів на оптимізацію виробничих процесів, зменшення рівня дефектності продукції та мінімізацію ручної праці в небезпечних умовах.

Методологія дослідження включає комплексний аналіз можливостей використання промислових дронів, математичне моделювання їхнього руху в умовах ливарного виробництва та експериментальну перевірку в реальних виробничих умовах. Розглянуто вплив високих температур, забруднення повітря металевим пилом та обмеженого простору на роботу дрона. Розроблена математична модель дозволяє оптимізувати траєкторії польоту для забезпечення точного позиціонування, мінімізації енергоспоживання та підвищення ефективності виконання завдань. Експериментальні дослідження підтвердили доцільність використання дронів для внутрішньоцехової логістики, автоматизованого нанесення покриттів і контролю якості виливків. Використання дронів дозволяє скоротити час транспортування матеріалів, покращити рівномірність нанесення покриттів та здійснювати ефективний моніторинг виробничих процесів, що позитивно впливає на якість продукції та знижує виробничі витрати.

Отримані результати свідчать про високу ефективність застосування промислових дронів у ливарному виробництві, що сприяє його модернізації та підвищенню рівня автоматизації. Запропоновані рекомендації щодо покращення роботи дронів, зокрема оптимізація алгоритмів навігації та вдосконалення термозахисту, були впроваджені на підприємстві та інтегровані у навчальний процес. Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка вдосконалених сенсорних систем, підвищення стійкості дронів до екстремальних умов та розширення їхнього функціоналу для застосування в інших промислових галузях.

автоматизація, ливарне виробництво, промислові дрони, модернізація, роботизація, Industry 4.0, безпека праці

Одержано (Received) 23.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.04.2025

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 004.89:656.13:658.5

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.143-159](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159)

А. О. Головатий, В. М. Чумак, Є. В. Манько, В. В. Аулін, проф., д-р техн. наук,
Д. О. Кульова, д-р філос.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: aulinvv@gmail.com, artemholovaty@gmail.com, d.coolava@gmail.com

Вдосконалення математичного моделювання машинобудівних технологій для смарт-підприємств в системі машинного зору

У статті розглядається питання математичного моделювання машинобудівних технологій системи машинного зору в умовах переходу до смарт-підприємств, які є основою сучасної Індустрії 4.0. Зазначається, що традиційні підходи до моделювання не повною мірою відповідають вимогам цифрового виробництва, що характеризується високою динамічністю, необхідністю інтеграції з кіберфізичними системами, технологіями Інтернету речей (IoT) та адаптивного управління в реальному часі.

Показано, що моделювання машинобудівних технологій на смарт-підприємстві як формалізованого підходу базується на специфікації підсистем і сукупності факторів. Дано характеристики математичних моделей, які можуть достатньо точно описати виробничі процеси на підприємстві. При цьому враховується специфіка структури, складу, ключові функціональні призначення та інженерні, економічні та його програмно-апаратні аспекти, а також умови машинобудівних виробництв у відповідності до концепції кіберфізичної системи.

Визначено, що згідно з кіберфізичним підходом ступінь автоматизації технологічного обладнання варіюється від базових до високорівневих рішень. Це обумовлює моделювання виробничих процесів і технологій та побудову математичних моделей та їх параметризацією для подальшого використання в умовах мережевої взаємодії при створенні смарт-виробництва та смарт-підприємств. З'ясовано, що зазначене потребує використання системи машинного (технічного зору) для забезпечення автоматизацію процесів контролю якості продукції (послуг) та управління шляхом обробки та інтерпретації системи інформації.

Виявлені можливості впровадження системи машинного зору на машинобудівних підприємствах. Розглянуто в зв'язку з цим такий метод штучного інтелекту як штучні нейронні мережі. Сформульовані завдання у системах машинного (технічного) зору з використанням методу штучних нейронних мереж. Визначені переваги цього методу на цифрових виробництвах, на смарт-підприємствах.

З'ясована інтеграція машинного зору з робототехнічними системами. Визначено низку функцій комплексу "машинний зір-робот" і можливостей керування рухом роботів під час виконання завдання управління роботизованими платформами з використанням моделі різних типів штучних нейронних мереж. Розроблено структуру інтелектуальної систем управління робототехнічними та мехатронними системами з рядом функціональних модулів. Розглянуто на смарт-підприємстві автоматизовані комплекс для виготовлення і складання деталей та машин, інтелектуальні виробничі системи. Функціональність інтелектуальних виробничих систем базується на моделюванні з використанням систем масового обслуговування. Розглядаються багатозадачні одно- та багатоканальні системи масового обслуговування. Визначено можливості моделей автоматизованих виробничих систем та застосування багаторівневих комп'ютерних моделей у SCADA-системах. Показано ефективність створених смарт-підприємств на платформі кіберфізичної системи та інтеграція їх у єдину мережу виробничих систем машинобудування. При цьому використовуються різноманітні системи автоматизованого проєктування, технологічна підготовка виробництва, єдина база даних буде мати систему управління даними про виробника і математичне моделювання передових технологій машинобудування на смарт-підприємствах.

технологія машинобудування, виробництво, машинний (технічний) збір, кіберфізична система, смарт-підприємство, математичне моделювання, оптимізація, інтелектуальне управління, штучна нейронна мережа

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку машинобудівної галузі обумовлюють перехід до смарт-підприємств, де ключову роль відіграють цифрові технології, автоматизація та інтеграція виробничих процесів у єдину кіберфізичну систему.

Одним із критичних елементів цього переходу є здатність точно описувати, аналізувати та оптимізувати виробничі процеси, що характерні для машинобудування. У зв'язку з цим зростає значення математичного моделювання як інструменту для формалізації складних технологічних процесів, прийняття рішень у реальному часі та підвищення ефективності виробництва [1,2].

Однак традиційні підходи до моделювання часто не враховують особливостей смарт-середовища: динамічності даних, інтеграції з IoT (Internet of Things)-пристроями, адаптивного управління та самонавчання систем [1,2]. Спостерігається розрив між теоретичними моделями та їх практичною реалізацією в умовах цифрового виробництва. В зв'язку з цим існує потреба у розробці нових математичних моделей або адаптації існуючих. Вони повинні відображати специфіку машинобудівних процесів у контексті смарт-підприємств [2-4].

Серед сукупності питань, які слід розв'язати, актуальним є питання формалізації машинобудівних технологій за допомогою математичних моделей, здатних працювати в умовах високої змінності, цифрової взаємодії та багатофакторного середовища [5,7,8]. Розв'язання цього питання дозволить підвищити ефективність виробництва, зменшити витрати та забезпечити адаптивність виробничих систем до змін у попиті та умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із найгостріших викликів для сучасних транспортних та виробничих підприємств є суттєве підвищення собівартості продукції або послуг, що пов'язане зі зростанням вимог споживачів до їх якості. При цьому, незважаючи на орієнтацію на інновації, пов'язані з виробничою, інформаційною та інтелектуальною складовою виробництва, вирішальною конкурентною перевагою залишається доступна ціна. Це обумовлює необхідність впровадження стратегій зниження витрат без втрати експлуатаційних характеристик продукції, що, у свою чергу, забезпечує підприємствам стабільність і можливість розширення частки на ринку [5,6].

Ще однією немало важною проблемою вітчизняних виробників є втрата уніфікованості продукції, що зменшує її сумісність з іншими товарами або сервісами [1,2]. Це пов'язано з недосконалістю чинної системи стандартизації та відсутністю належного рівня гармонізації з міжнародними нормами [13,14]. Ситуація вимагає від підприємств переорієнтації на випуск продукції, сумісної з глобальними аналогами, та активного пошуку механізмів зниження витрат у ланцюгах постачання, виготовлення та реалізації [15,17].

Згідно з аналітичними матеріалами дослідження [5,9], вирішення означених проблем можливе через інтеграцію логістичних і інформаційних систем на підприємствах. Впровадження логістичного підходу сприяє зменшенню обсягів запасів сировини, комплектуючих і готової продукції, підвищує оборотність активів, оптимізує виробничі витрати й водночас забезпечує високий рівень обслуговування клієнтів.

Європейська логістична асоціація наводить дані [9-11], які свідчать, що використання логістичних технологій дозволяє скоротити тривалість виробничих циклів на 25%, зменшити собівартість продукції до 30%, а також знизити обсяги запасів на складах і витрати на обслуговування на 30%. За оцінками деяких експертів [5,9], ефективне застосування логістичних стратегій здатне підвищити прибутковість підприємства більш ніж на 40%.

На закордонних підприємствах широко застосовується стандартизована методика логістичного планування, зокрема система MPS (Master Planning Scheduling), яка ґрунтується на об'ємно-календарному плануванні. Вона включає формування графіків реалізації продукції, планування поповнення запасів і аналіз фінансових

результатів підприємства за певні періоди. Водночас дана методика передбачає сталий попит і обмежений асортимент, що знижує її ефективність для великих або динамічних виробництв [18-20].

Більш гнучкою альтернативою є модель логістичного управління SIC (Statistical Inventory Control), яка базується на розрахунку точки замовлення – рівня залишків на складі, за якого необхідно ініціювати поповнення. У цій системі також визначаються граничні значення обсягу запасів, перевищення яких не є економічно доцільним. Дана модель адаптивна й дозволяє враховувати сезонні коливання попиту та зміни в часі поставок [21-24].

Ситуація значно ускладнюється, коли мова йде про виготовлення технічно складної продукції. У таких випадках технологічний процес включає не лише збірку готових виробів, а й виготовлення окремих компонентів та вузлів. Це породжує необхідність прийняття рішень щодо внутрішнього або аутсорсингового виконання окремих операцій і підвищує вимоги до точності та своєчасності постачання складових.

Для вирішення проблем ресурсного планування в умовах складного виробництва застосовується концепція MRP (Material Requirements Planning), що передбачає формування замовлень на комплектуючі на основі графіка випуску продукції. Аналогічна система CRP (Capacity Requirements Planning) орієнтована на облік виробничих потужностей. У поєднанні ці методики утворюють систему MRP II – інтегровану систему планування виробничих ресурсів [25,26].

MRP II тісно взаємодіє з такими засобами, як автоматизовані системи керування виробництвом (АСУ ТП), системи автоматизованого проєктування (САПР) та інші програмні комплекси, що забезпечують комплексну підтримку управлінських рішень. Цей підхід дозволяє не лише оптимізувати логістику, а й покращити технологічну та організаційну структуру виробництва [27,28].

Наступною еволюційною сходинкою у розвитку логістичних систем стала ERP (Enterprise Resource Planning) – система, що забезпечує управління всіма ресурсами підприємства. Вона відрізняється відкритістю, мобільністю, використанням реляційних баз даних та архітектури клієнт-сервер, що значно розширює її функціональні можливості [5,9].

Найбільш інноваційною логістичною концепцією наразі є система CSRP (Customer Synchronized Resource Planning), яка орієнтована на споживача й охоплює повний життєвий цикл продукції – від виробництва до маркетингу, обслуговування та зворотного зв'язку. Центральною ідеєю CSRP є забезпечення покупцеві впливу на виробничі процеси через надання індивідуалізованих замовлень. Такий підхід сприяє підвищенню конкурентоспроможності виробника та дозволяє швидше реагувати на зміни ринку [5,29,30].

Впровадження подібних систем і смарт-технологій сприяє постійному оновленню асортименту товарів, вдосконаленню супутніх послуг, а також глибшому розумінню споживчих очікувань. CSRP передбачає перенесення акценту з виробничого планування на планування попиту, що повністю змінює логіку організації виробництва [31,32].

Аналіз сучасних логістичних підходів демонструє, що їх еволюція тісно пов'язана з ключовими економічними трендами: зростаючою спеціалізацією в промисловості, посиленням конкуренції, появою нових моделей співробітництва, цифровізацією процесів та впровадженням гнучкого виробничого обладнання. Підприємства змушені адаптуватися до невизначеності зовнішнього середовища, забезпечувати гнучкість і скорочення витрат у логістичних ланцюгах [33,34].

У таких умовах логістичні системи повинні створювати нові конкурентні переваги, інтегрувати функціональні підсистеми підприємства, скорочувати обсяг

запасів, зменшувати кількість проміжних ланок у постачанні й дистрибуції, а також ефективно управляти як матеріальними, так і інформаційними потоками. Це вимагає системної інтеграції процесів та переходу до автоматизованого управління, що ґрунтується на математичних моделях і цифрових технологіях [35,37].

Постановка завдання. Метою роботи є розробка підходів вдосконалення математичних моделей машинобудівних технологій в системі технічного машинного зору, орієнтований на умови функціонування смарт-підприємств. Реалізація мети дозволить на смарт-підприємстві забезпечити підвищення точності, ефективності та гнучкості виробничих систем у нових умовах Індустрії 4.0. При цьому врахування вимоги цифровізації, інтеграції з кіберфізичними системами та адаптивного логістичного управління виробничими процесами.

Виклад основного матеріалу. Однією з визначальних характеристик смарт-підприємств та інтелектуальних виробництв є впровадження інтегрованих кіберфізичних систем (КФС), що функціонують у єдиному інформаційному середовищі з метою підвищення продуктивності та ефективності виробничих процесів [1, 3]. Центральним компонентом КФС є математичні моделі об'єктів або процесів, в межах яких "розумні" елементи здатні здійснювати обмін даними та взаємодіяти в мережевому середовищі. Застосування таких моделей у процесі проектування та функціонування КФС забезпечує оброблення інформації, що надходить від сенсорів і виконавчих механізмів, з подальшою її передачею мережею для аналізу та прийняття рішень. Це, у свою чергу, сприяє інтеграції інформаційних технологій з автоматизованими системами управління технологічними процесами.

Моделювання машинобудівних технологій на смарт-підприємстві реалізується шляхом формалізованого підходу, який базується на специфікації всіх підсистем підприємства та сукупності факторів. Характеристики математичних моделей, що можуть описувати виробничі системи, зумовлені специфікою їх структури, складу та функціонального призначення. У науковій літературі представлено низку моделей і методів опису ключових процесів, характерних для машинобудівних підприємств, які охоплюють інженерні, економічні та програмно-апаратні аспекти [39-41].

Інженерні аспекти розробки КФС для виробничих підприємств висвітлюються у працях А. Фіні, С. Фрешетта, В. Срінівасана [37], тоді як питання моделювання роботи контролерів у складі КФС розглядаються М. Реньєрсом, Ж. Мортель-Фрончак і К. Рулофсом [35]. Значний внесок у створення моделей для оцінювання ефективності кіберфізичних виробничих систем зробили М. Вейрих, М. Кляйн, Дж.-П. Шмідт та інші науковці [11,15,41]. Водночас наявні підходи мають переважно загальний характер, а відсутність чіткої формалізації ключових параметрів виробничих систем підприємства ускладнює їх практичне застосування в умовах реального виробництва.

У дослідженні [42] на основі аналізу міжнародного досвіду економіко-математичного моделювання смарт-підприємств встановлено, що наявний методичний апарат є фрагментарним та недостатньо уніфікованим. Розроблені рекомендації здебільшого стосуються вже функціонуючих смарт-виробництв, тоді як питання формування таких підприємств із використанням математичних моделей залишаються не до кінця вирішеними. Це, у свою чергу, ускладнює перехід до розв'язання конкретних прикладних завдань на підприємствах машинобудівного профілю в умовах впровадження концепції Індустрії 4.0.

У загальному вигляді можна виділити наступні ключові класи типових завдань (функціонального призначення), що найчастіше вирішуються в умовах машинобудівного та транспортного виробництва, організованих відповідно до концепції КФС:

– завдання контролю та візуального аналізу продукції, що включають: контроль якості, простежуваність виробів, перевірку наявності об'єктів, вимірювання геометричних параметрів, зіставлення з еталонами, підрахунок одиниць продукції, ідентифікацію та класифікацію об'єктів, відбраковування, інспекцію з різних ракурсів, а також високоточні вимірювання окремих елементів (наприклад, заготовок чи деталей). До цього класу також належать завдання відстеження руху об'єктів. У більшості випадків реалізація таких завдань у межах автоматизованих систем здійснюється за допомогою технологій машинного зору;

– завдання, що стосуються основних технологічних процесів, зокрема послідовної зміни форми, розмірів і властивостей матеріалів з метою отримання деталей із заданими технічними параметрами. Сучасний рівень розвитку техніки передбачає застосування роботизованого технологічного обладнання, включаючи автономні роботизовані системи та мобільні комплекси. Такі системи дедалі частіше базуються на рішеннях зі штучним інтелектом, що істотно розширює їх функціональні можливості;

– завдання забезпечення екологічної безпеки та економічної ефективності функціонування технологічного обладнання, включаючи верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), із урахуванням відповідних екологічних та економічних обмежень.

Визначено, що згідно з кіберфізичним підходом, ступінь автоматизації технологічного обладнання може варіюватися від базових до високорівневих рішень, зокрема:

- використання контролерів і виконавчих механізмів (актуаторів);
- автоматизація управління виробничими процесами шляхом впровадження АСУ ВП на основі SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition);
- інтеграція технологічних даних АСУ ВП із корпоративною інформаційною системою підприємства шляхом використання масштабованих баз даних і баз знань;
- моніторинг стану обладнання та контроль за реалізацією технологічних операцій з автоматичною генерацією звітності для управлінського персоналу.

Виявлено, що на сучасному етапі розвитку багато методів моделювання виробничих процесів і технологій, що потребують аналізу відповідних математичних моделей, здатних ефективно розв'язувати типові виробничі завдання. При цьому передбачається параметризація моделей для їх подальшого використання в умовах мережевої взаємодії при створенні смарт-підприємств і виробництв. В зв'язку з цим, системи машинного (технічного) зору забезпечують автоматизацію процесів контролю якості продукції (послуг) та управління виробництвом шляхом обробки та інтерпретації системи інформації.

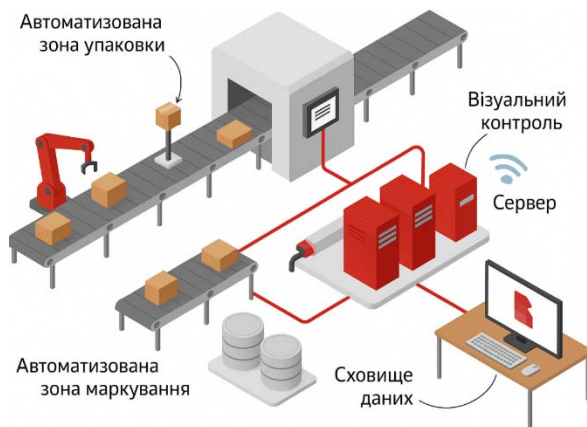


Рисунок 1 – Схематичне відображення елементів системи машинного (технічного) зору

Джерело: розроблено авторами з використанням кіберфізичного підходу

Для формування зображень у межах систем машинного зору застосовуються промислові відеокамери. Програмне забезпечення таких систем здійснює оброблення візуальної інформації в режимі реального часу з подальшою передачею результатів аналізу оператору, автоматизованим системам керування, робототехнічним комплексам або безпосередньо виконавчим механізмам, що беруть участь у регулюванні виробничого процесу. Особлива ефективність використання систем машинного зору спостерігається в умовах, коли обсяг, швидкість або складність інформації, що підлягає аналізу, значно перевищують когнітивні можливості людини-оператора.

Під час проєктування та впровадження таких систем активно застосовуються різноманітні математичні та інтелектуальні методи, зокрема методи стохастичної геометрії, інтерполяційні моделі на регулярних сітках, підходи кластерного аналізу, нейромережеві алгоритми тощо.

Зазначені методи дозволяють створювати моделі просторових об'єктів із заданим рівнем деталізації й складності, у тому числі з урахуванням багаторівневих та багат шарових структурних зв'язків. Це відкриває можливості для вирішення широкого спектра аналітичних завдань, зокрема обчислення об'ємних характеристик об'єктів у просторі, а також здійснення картографічної візуалізації територій із динамічною оцінкою їх функціонального стану.

Доведено, що з метою автоматизованого розпізнавання дефектів на поверхні заготовок у рамках систем машинного зору доцільним є використання методів кластерного аналізу, які дозволяють ефективно виявляти аномалії за геометричними або текстурними ознаками. Беруться множини об'єктів $V = \{1, \dots, n\}$, що визначені у якості ознаки зображень та відстані між ними. Також береться повний зважений орієнтований граф $G(V, A)$, де V – вершин графа, $A = \{uv: u \in V, v \in V, u \neq v\}$ – множина дуг в графі і $w_{uv} = d(u, v)$ – ваги дуг (відстані між цими об'єктами). Вводяться бінарні змінні $y_u(x_{uv})$, у відповідності до вершин $u \in V$ (дугам $uv \in A$). Змінна y_u дорівнює 1, у випадку коли вершина u є медіаною. Змінна x_{uv} дорівнює 1, коли вершина v належить до кластера, який визначається медіаною u . З цими позначеннями задача кластерного аналізу має формулювання задачі цілочисельного програмування:

$$\begin{aligned} \sum_{uv \in A} w_{uv} x_{uv} &\rightarrow \min_{(x,y)} ; \\ \sum_{u \in V, u \neq v} x_{uv} + y_v &= 1, \quad v \in V; \\ x_{uv} &\leq y_u, \quad uv \in A, u \in V; \\ \sum_{u \in V} y_u &= p, y_u \in \{0,1\}, \quad v \in V; \\ x_{uv} &\in \{0,1\}, \quad uv \in A. \end{aligned} \quad (1)$$

З метою скорочення часу, необхідного для виконання обчислень під час розв'язання задач розпізнавання образів, дедалі частіше застосовуються методи штучного інтелекту, насамперед штучні нейронні мережі.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) являють собою сукупність взаємопов'язаних обчислювальних елементів – так званих штучних нейронів. Такі мережі здатні обробляти вхідні дані, адаптуючи власну структуру та вагові коефіцієнти в процесі навчання, і на основі цього формувати набір вихідних сигналів, що відповідають розпізнаним образам або прийнятим рішенням.

Нейрон в цілому реалізує скалярну функцію деякого аргументу, коли $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, – функція "вхід-вихід нейрона". Цю функцію можна за допомогою математичної моделі нейрона:

$$\begin{cases} s = \sum_{i=1}^n w_i x_i; \\ y_f = f(s); \end{cases} \quad (1)$$

де x_i – компонента вхідного вектора (вхідний сигнал) $i = \overline{1, n}$;

w_i – синаптичні ваги;

s – результат підсумовування;

$f(s)$ – функція активації;

y_f – вихідний сигнал, $j = \overline{1, m}$.

У системах машинного (технічного) зору із використанням нейронних мереж типовими є завдання такого характеру: регресійне моделювання функцій за заданими дискретними точками; класифікація вхідних даних згідно з наперед визначеними класами; кластеризація з метою виявлення нових, раніше не описаних прототипів; стискання інформації; реконструкція втрачених даних; реалізація асоціативної пам'яті; вирішення задач оптимального керування.

У залежності від специфіки конкретного завдання використовуються відповідні архітектури нейромережових моделей. Системи машинного зору, які функціонують на основі нейронних мереж, широко впроваджуються для технічної діагностики та автоматизованого контролю якості в галузі машинобудування, випереджаючи традиційні методики, зокрема градієнтні, статистичні, шаблонні або алгоритми локальної адаптації. Після етапу навчання ШНМ здатні ефективно відсікати шумові компоненти та працювати виключно з релевантною інформацією. Їхня адаптивність до змін середовища є ключовим фактором, що забезпечує можливість самонавчання – одного з найвагоміших функціональних переваг ШНМ. Основними перевагами ШНМ при застосуванні на цифрових виробництвах є швидкодія, відмовостійкість і здатність до самоорганізації.

Інтелектуальні системи зорової аналітики, побудовані на базі нейронних мереж, дозволяють розв'язувати низку критично важливих задач у промисловому середовищі: розпізнавання маркувальних позначень на заготовках і готових виробах у реальному часі; обробка лінійних та двовимірних штрих-кодів; відстеження продукції на всіх етапах; виявлення присутності об'єктів; геометричні вимірювання; порівняльний аналіз із еталоном; підрахунок одиниць продукції; ідентифікація за формою чи кольором; забезпечення зору для роботів; повноцінна інспекція якості; виявлення дефектів на поверхнях; аналіз робочого часу; 3D-сканування; логістична обробка даних.

Інтеграція машинного зору з робототехнічними системами істотно розширює спектр доступних виробничих операцій. Комплекс "машинний зір-робот" реалізує низку функцій, таких як транспортування, автоматизоване завантаження/розвантаження, сортування, відбраковування, інспекція з усіх ракурсів. Переваги таких рішень полягають у можливості керування рухом роботів під час виконання завдань, забезпеченні точного контролю, уникненні аварійних ситуацій, зменшенні потреби в дорогому високоточному обладнанні та гнучкості в обробці різнотипних об'єктів без потреби частого переналаштування.

В умовах сучасного підприємства машинобудування активно впроваджуються роботи, мехатронні й робототехнічні системи, функціональні можливості яких суттєво зросли завдяки вдосконаленню систем керування на основі прогресу в обчислювальній техніці.

Моделювання робіт із послідовним кінематичним ланцюгом зазвичай здійснюється за допомогою стандартних аналітичних методів та програмного забезпечення, що дозволяє проводити подальший аналіз і формувати відповідні алгоритми керування. Обчислення необхідних моментів і потужностей, які розвиваються у приводах рухомих ланок робота під впливом зовнішніх навантажень, є основою для проектування привідних систем та інтеграції їх у єдину цифрову мережу підприємства з метою реалізації системи оперативного управління виробництвом.

Для побудови автономних інтелектуальних систем управління роботизованими платформами активно використовуються моделі різних типів ШНМ. Загальна архітектура таких систем представлена на рисунку 2.

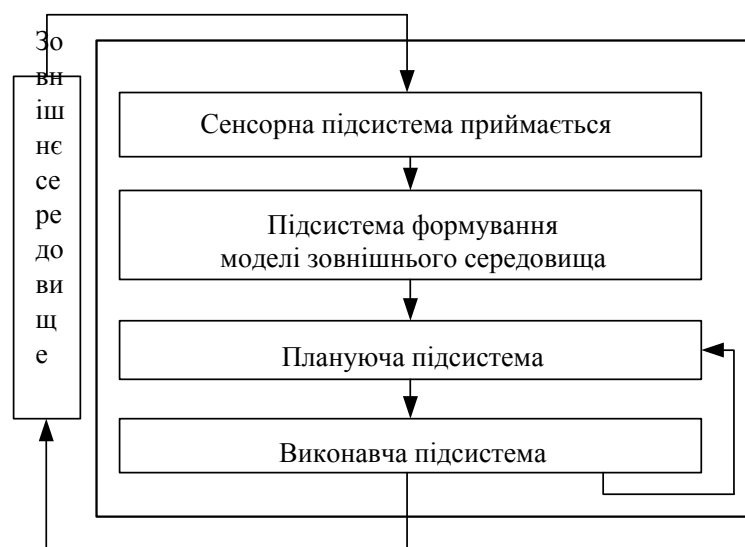


Рисунок 2 – Структура інтелектуальної системи управління робототехнічними та мехатронними системами

Джерело: розроблено авторами

Структура програмного комплексу, призначеного для моделювання системи ШНМ в інтелектуальному управлінні робототехнічними та мехатронними системами, включає такі функціональні модулі:

- модуль емуляції сенсорної системи, що реалізує програмне моделювання сприйняття зовнішнього середовища;
- модуль-блок збору даних про навколишнє середовище, який відповідає за отримання необхідної інформації з "віртуальних" сенсорів;
- модуль тривимірної емуляції середовища, що дозволяє візуалізувати навколишній простір і моделювати взаємодію робота з ним;
- ШНМ-планувальник, який реалізує алгоритми прийняття рішень щодо переміщення та вибору траєкторії руху;
- модуль побудови моделі прохідності, який аналізує дані сенсорного модулю та ідентифікує перешкоди, визначаючи прохідні ділянки для формування карти перешкод;
- центральне ядро системи, що забезпечує синхронізовану роботу всіх складових та надає інтерфейс для підключення або відключення окремих модулів.

Представлена структура інтелектуальної системи управління рухом автономного робота дозволяє сформувати загальне уявлення про промислові інтелектуальні системи управління.

У сучасному підприємстві машинобудування автоматизація виробничих процесів є складним і самостійним напрямом, який стає основою побудови смарт-фабрик, смарт-заводів, на основі кіберфізичних систем (КФС). Використання математичного моделювання роботизованих пристроїв сприяє розробці новітнього обладнання, оптимізації технологій і організації виробництва, а також інтеграції всіх елементів у єдине мережеве середовище на основі ключових параметрів функціонування.

На сьогодні машинобудівні смарт-підприємства широко застосовують автоматизовані комплекси для виготовлення й складання деталей та машин, а також системи керування виробничими процесами. Еволюція таких систем призводить до формування інтелектуальних виробничих систем (IVC), що виникли як результат розвитку інформаційних технологій. Аналіз етапів розвитку IVC показує, що її центральним компонентом є комп'ютерна система керування. Окрім програмного управління, IVC виконує функції аналізу, розпізнавання інформації, візуалізації даних та ухвалення рішень, необхідних для адаптивного реагування на зміни в процесі виробництва.

Функціональність IVC базується на математичних моделях, створених шляхом комп'ютерного моделювання з великим обсягом обчислень. У моделюванні таких систем використовується широкий набір математичних засобів. З огляду на велику різноманітність виробничого обладнання та організаційних форм у машинобудівних і транспортних підприємствах, виникає потреба у проведенні багатоваріантного аналізу процесів для вибору оптимальної конфігурації IVC.

У виробничому середовищі операції типу встановлення/зняття заготовки, підведення/відведення інструмента, обробка, контроль належать до дискретних дій, що реалізуються у дискретно-подієвих системах. Моделювання таких процесів у більшості випадків (~80%) базується на теорії систем масового обслуговування (СМО) [92].

Автоматизовані виробничі комплекси можна змодельовати як мережі багатofазних одно- та багатоканальних СМО, які функціонують без відмов, мають стандартну чергу типу FIFO та обмежений потік вхідних заявок згідно з виробничим планом. Сукупність параметрів такої СМО можна поділити на частково перетинні підмножини, кожна з яких пов'язана з часом обслуговування заявки. Відповідно, час виготовлення продукції визначається сумою окремих етапів обробки:

$$T_0 = \sum_{i=1}^N t_i + \sum_{j=2}^P t_j + \sum_{k=0}^Q t_k + \sum_{n=0}^S t_n, \quad (3)$$

де t_i – тривалість i -ої операції обробки заготовки; включаючи час на її установку/зняття;

N – загальна кількість операцій для виготовлення вибору;

t_j – тривалість транспортування заготовки між робочими місцями;

P – число j -х переміщень заготовки;

Q – загальна кількість простоїв виробництва;

t_k – час очікування заготовки перед робочим місцем або транспортуванням, $t_k =$

$f(\lambda, t_i, n)$ – функція часу очікування ;

λ – інтенсивність надходження заявок;

n – кількість верстатів або транспортних засобів, які працюють паралельно;

t_n – інший час простоїв (позациклові втрати).

Для виконання розрахунків даного показника використовується теорія імовірнісних мереж, яка базується на застосуванні марковських та напівмарковських процесів, де застосовуються експоненційні закони розподілу. У процесі моделювання

дискретних систем можливим є використання мови GPSS, яка призначена для імітаційного моделювання. Аналіз часових характеристик, зокрема часу проходження об'єктів у моделі та завантаженості ресурсів під час її роботи, дозволяє визначити ключові параметри функціонування автоматизованої виробничої системи – її продуктивність та рівень використання обладнання.

Моделі автоматизованих виробничих систем дозволяють:

- проводити зіставлення різних варіантів автоматизації та обирати оптимальний за ефективністю;
- оцінювати продуктивність із врахуванням непродуктивних витрат;
- визначати шляхи підвищення ефективності використання технічних засобів шляхом оптимізації часових і просторових параметрів технологічного процесу;
- виявляти "вузькі місця" у виробничому ланцюзі та усувати їх;
- знаходити найкращу конфігурацію виробничого процесу на етапі проектування.

У сучасних інтелектуальних виробничих системах (IBC) активно використовується концепція модельно-орієнтованого управління, яка передбачає застосування численних комп'ютерних моделей на різних рівнях ухвалення рішень. Основні виробничі завдання вирішуються за допомогою спеціалізованих програмних платформ, зокрема з використанням мереж Петрі, а також компонентно-орієнтованих методів моделювання, аналізу та верифікації процесів складання.

Такі моделі дозволяють детально описувати технологічні процеси складання продукції, здійснювати перевірку коректності цих процесів, оцінювати характеристики виробів, що виготовляються, а також планувати ресурси – обладнання, інструменти, оснащення – і розраховувати часові параметри технологічних операцій. Подібні функціональні можливості реалізовано в системах управління життєвим циклом продукції (PLM – Product Lifecycle Management), що є прикладним програмним забезпеченням для управління продукцією на всіх етапах її створення та експлуатації.

Застосування багаторівневих комп'ютерних моделей у SCADA-системах дає змогу за допомогою математичних моделей визначати, встановлювати та підтримувати оптимальні режими роботи технологічного обладнання промислових підприємств. Ці режими враховують як економічну ефективність, так і екологічну безпеність, з урахуванням наявних технологічних обмежень.

У межах SCADA-систем реальними об'єктами можуть виступати як виробничі процеси (наприклад, робота верстатів, конвеєрних ліній, роботизованих комплексів), так і управлінські функції в межах машинобудівного підприємства. SCADA-системи розглядаються як новий щабель розвитку АСУ ТП у різних галузях. Вони представлені у вигляді апаратно-програмних комплексів, що забезпечують збір первинних даних, їх обробку, візуалізацію у зручному для оператора форматі та протоколювання управлінських дій.

Програмна складова SCADA-системи реалізується на комп'ютері та має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача. Це забезпечує вичерпне і наочне відображення інформації, зручність у керуванні процесами, доступність довідкової інформації та підказок. Завдяки функціональним компонентам диспетчер може своєчасно отримувати необхідну інформацію та оперативно впливати на роботу керованих підсистем.

Визначено, що сучасний напрямок розвитку SCADA-систем полягає в інтелектуалізації процесу прийняття управлінських рішень, що означає їх часткову або повну автоматизацію. Це дозволяє у межах встановлених вимог і обмежень визначати рекомендаційні управлінські впливи на об'єкт, які відображаються на екрані оператора

SCADA. Для реалізації таких функцій застосовують різноманітні математичні моделі, експертні системи з наборами знань і нейронні мережі.

Дослідження підтверджують, що для автоматизації виробничих процесів у машинобудуванні та транспортній сфері, зокрема у контексті створення смарт-підприємств на базі КФС, доцільно впроваджувати математичні моделі штучних нейронних мереж, а також марківські і напівмарківські моделі управління роботизованими платформами. Це дає змогу розробляти інноваційне обладнання, вдосконалювати технологічні процеси і системи організації виробництва, а також інтегрувати їх у єдиний мережевий простір підприємства за допомогою ключових формалізованих параметрів.

Показано, що у рамках створення смарт-підприємств та інтеграції КФС у єдину мережу виробничих систем машинобудування пріоритетним є розвиток нових і модернізація існуючих автоматизованих систем для виробництва, складання деталей і управління процесами. Рекомендується застосовувати формалізацію виробничих операцій на основі мереж Петрі, математичних моделей теорії масового обслуговування, імітаційного моделювання та нейронних мереж.

КФС, що базуються на математичному описі виробничих процесів у машинобудівних підприємствах, дозволяють моделювати технологічні операції, аналізувати продукцію, оцінювати ресурси і обладнання. Вони забезпечують інтеграцію у єдиний мережевий простір підприємства КФС з різноманітними системами автоматизованого проектування (CAD), технологічної підготовки виробництва (CAPP), єдиною базою даних, а також системами управління даними про виробу (PDM).

Незважаючи на значний потенціал, зазначені підходи поки що не набули широкого розповсюдження на українських машинобудівних підприємствах через технологічне відставання і недостатній рівень інноваційного розвитку більшості виробництв.

Показано, що для успішного впровадження математичних моделей і методів у рамках КФС на підприємствах машинобудування необхідно виконати низку умов: оцінити потенціал підприємства; виявити наявні КФС та їх інтеграцію в єдине інформаційне середовище; визначити потреби у розробках і модернізації систем; організувати безперервність виробництва під час модернізації; підготувати персонал і програмне забезпечення у сфері ІТ. Це включає перекваліфікацію працівників, найм ІТ-фахівців, створення відділів автоматизації, впровадження зручного програмного забезпечення, організацію хмарних сховищ та серверів для обробки великих обсягів даних, а також забезпечення надійного та швидкісного мережевого зв'язку на підприємстві.

Доведено, що КФС дозволяють контролювати виробничі процеси в режимі реального часу: дані з датчиків надходять у віртуальні моделі, побудовані на основі математичних параметрів, що формують цифрові копії реальних процесів і дають змогу отримувати необхідну інформацію без фізичної присутності на виробництві. Системи КФС також забезпечують зв'язок між виробничими процесами та системами управління підприємством.

Виявлено, що на сучасному рівні впровадження КФС дає змогу ефективно планувати виробничі потужності, контролювати якість продукції та управляти ресурсами. Важливим аспектом є забезпечення інформаційної безпеки підприємства – захист від несанкціонованого доступу і зловживань, а також експлуатаційна безпека систем для людей і навколишнього середовища.

Встановлено, що математичні моделі, які розробляються для провідних машинобудівних та транспортних технологій, дають змогу формалізувати ключові процеси виробництва та використовувати параметри цих моделей для ефективної мережевої взаємодії систем на смарт-підприємствах.

Показано, що особливо перспективними для впровадження є моделі штучних нейронних мереж, оскільки вони охоплюють широкий спектр завдань: від машинного зору і робототехніки до автоматизації і інтелектуалізації виробництва і транспорту. Перевагами таких моделей є здатність до навчання і самонастроювання, швидкість обробки та відмовостійкість – критично важливі характеристики для смарт-виробництва. Основною складністю залишається необхідність великого обсягу даних для навчання, що може бути проблематичним через унікальність виробничих процесів і конструкцій. Ключовою ланкою при цьому є інтелектуальна праця конструкторів, які працюють у модулях інженерних розрахунків і оптимізації в рамках систем CRM, CAD і CAE. Незважаючи на наявність допоміжних інструментів, результат значною мірою залежить від людського фактору.

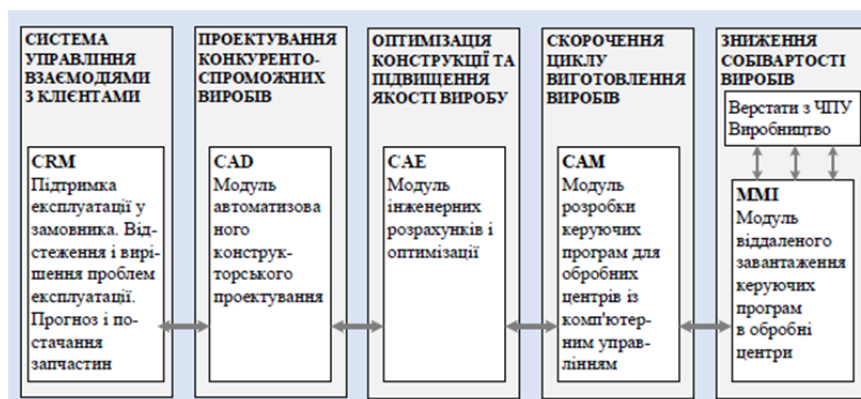


Рисунок 3 – Система управління життєвим циклом продукції в рамках єдиного інформаційного середовища на смарт-підприємстві

Джерело: розроблено авторами

Внаслідок математичного моделювання передових технологій машинобудування на смарт-підприємствах забезпечується інтеграція КФС у єдиний мережевий простір. Ця інтеграція здійснюється у межах формалізованих параметрів математичних моделей і охоплює взаємодію з різноманітними системами: CAD, системами технологічної підготовки виробництва (CAPP ТП/CAPP), централізованими базами даних (Big Data), системами управління даними про продукцію (PDM), а також SCADA-системами для керування виробничими та управлінськими процесами.

Для трансформації промислових підприємств на смарт-підприємства необхідно створити відповідні умови: підготувати висококваліфікований ІТ-персонал, забезпечити наявність сучасного програмного забезпечення, організувати хмарні сховища чи серверні платформи для зберігання великих обсягів даних, а також запровадити широкосмугові канали зв'язку. В межах КФС важливо гарантувати ефективну взаємодію між виробничими процесами та системами управління підприємством, а також забезпечити безпеку єдиної інформаційної системи підприємства і надійну експлуатацію.

Реалізація зазначених підходів до математичного моделювання передових технологій машинобудування вимагає врахування специфіки конкретного виробництва, організаційної структури підприємства, рівня автоматизації та впроваджених КФС. Перспективними напрямками подальших досліджень є вдосконалення та адаптація розглянутих моделей і методів під особливості конкретних машинобудівних

підприємств з урахуванням впровадження концепції Індустрії 4.0 у вітчизняну промисловість.

Висновки.

1. Визначено, що відмітною особливістю смарт-підприємств як виробничих, так і транспортних є формування інтегрованих кіберфізичних систем. Показано, що вони вирішують основні класи типових завдань на машинобудівному і транспортному виробництві.

2. Проаналізовані основні методи математичного моделювання виробничих процесів і технологій. Це передусім методи стохастичної геометрії, інтерполяційні методи на регулярних решітках, методи кластерного аналізу, нейромережеві технології та методи штучного інтелекту. Показано їх застосування в моделях машинного зору, але інженерного напрямку, моделях просторових об'єктів: роботів, мехатронних та робототехнічних систем.

3. З'ясовано, що найбільш ефективним для розробки інтелектуальних систем управління робототехнічними і мехатронними системами на базі кіберфізичного підходу на смарт-підприємстві використання методів штучних нейронних мереж. Виявлені основні модулі, що містяться в структурі програмного комплексу для моделювання штучних нейронних мереж.

4. Дана характеристика інтелектуальних виробничих систем на підприємстві, його основного елементу – комп'ютерної системи управління, основних функцій. Визначено, що для моделювання такої системи бажано використати методи, теорій систем масового обслуговування. З'ясовано визначення тривалості виготовлення виробу на промисловому підприємстві через його складові, а також розглянуто можливість використання методів теорії ймовірностей мереж заснованих на марківських і напівмарківських процесах.

5. Показано можливість формування багаторівневих комп'ютерних моделей SCADA-систем, їх призначення в автоматизованій системі управління. Обґрунтовано використання SCADA-системах в інтелектуалізації процесу прийняття управлінських рішень з повною або частковою автоматизацією.

6. Визначено, що смарт-підприємства формуються у межах створення кіберфізичної системи на підприємстві. Сформульовані умови вирішення основних виробничих завдань на смарт-підприємствах. Показано, що у результаті математичного моделювання передових машинобудівних технологій на смарт-підприємстві, використовуючи формалізовані параметри математичних моделей забезпечується взаємодія кіберфізичної системи з різними автоматизованими системами у єдиному мережевому просторі.

Список літератури

1. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.О. Кіберфізичний підхід при створенні, функціонуванні та удосконаленні транспортно-виробничих систем. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С.331-343.
2. Смарт-промисловість: напрями становлення, проблеми і рішення: монографія / В.П. Вишневський, О.В. Вієцька, О.А. Вієцький та ін., за ред. В.П. Вишневського; НАН України, Ін-т економіки пром-сті. Київ, 2019. 464 с.
3. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем : монографія / В. В. Аулін, А. В. Гриньків, А. О. Головатий [та ін.] ; під заг. ред. В. В. Ауліна. Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2020. 428с.
4. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.О. Інтелектуальні транспортні системи як результат впровадження інноваційних ефективних технологій. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability*: матеріали Міжнародної науково-практичної конф., 15-17 квітня 2020 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С.207.
5. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Головатий А.О., Голуб Д.В. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2021. 503 с.

6. Асоціація Підприємств Промислової Автоматизації України. Бар'єри та перспективи ІоТ та Індустрії 4.0. URL: <http://appau.org.ua/Baryery-i-perspectivy-IoT-i-Industriyi-4-0.html> (дата звернення: 20.05.2025).
7. Коваленко І.І., Бондаренко С.В. *Цифрові технології в машинобудуванні*. Харків: НТМТ, 2020. 248 с.
8. Индус М.П., Левченко О.В. Математичне моделювання технічних систем. К.: Либідь, 2019. 312 с.
9. Наукові засади управління логістичними системами на промислових підприємствах [Текст] : монографія. Іванова Марина Іллівна; Клас. приват. ун-т. Дніпро : Грані, 2017. 427 с.
10. Industrie 4.0 Germany Trade & Invest. 2018. Available at <https://www.gtai.de/GTAI/Navigation/EN/Invest/Industries/Industrie-4-0/Industrie-4-0/industrie-4-0-what-is-it.html> [Accessed 20 Apr. 2025].
11. Camarinha-Matos L.M., Parreira-Rocha M., Ramezani J. eds. Technological Innovation for Smart Systems: 8th IFIP WG 5.5/SOCOLNET. Advanced Doctoral Conference in Computing, Electrical and Industrial Systems: DoCEIS 2017 (Costa de Caparica, Portugal, May 3-5, 2017). IFIP International Federation for Information Processing: Springer, 2017.
12. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Лівіцький О.М. та ін. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів Technical service of agriculture, forestry and transport systems*. №22' 2020. С. 162-174.
13. Brynjolfsson E., McElheran K. Data in Action: Data-Driven Decision Making in U.S. Manufacturing. Available at http://www.economics.comell.edu/sites/default/files/files/events/Brynjolfsson_McElheran_AEA_2016.pdf [Accessed 20 Apr. 2025].
14. Cachada A., Pires F., Barbosa J., Leitão P. & Calà A. Petri nets Methodology for the Design and Control of Migration Processes towards Industry 4.0. 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). 2018. P. 540-545.
15. Cheng-Leong A., Li Pheng K. & Keng Leng G.R. IDEF: A comprehensive modelling methodology for the development of manufacturing enterprise systems. International Journal of Production Research. 1999. 37 (17). P. 3839-3858.
16. De Sousa V.M. & Del Val Cura L.M. Logical Design of Graph Databases from an Entity-Relationship Conceptual Model. In Proceedings of the 20th International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services (iiWAS2018). ACM, New York. NY, USA. 2018. 183-189.
17. Digitale Wirtschaft und Gesellschaft Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2018. Available at: <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>. [Accessed 20 Apr. 2025].
18. Xu X. Machine tool 4.0 for the new era of manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 1893-1900.
19. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Springer, 2017.
20. Zhang Y., Ren S., Liu Y. A framework for smart production-logistics systems based on CPS and industrial big data. IEEE Trans. Industrial Informatics. 2017. Vol. 14(9). P. 4019-4032.
21. Гайдай О.П. Інтернет речей у виробництві: можливості та перспективи. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2021. №2. С. 45-52.
22. Auschitzky E., Hammer M., Rajagopaul A. How big data can improve manufacturing. McKinsey. Available at <http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/ourinsights/how-big-data-can-improve-manufacturing> [Accessed 20 Apr. 2025].
23. Cachada A., Pires F., Barbosa J., Leitão P. & Calà A. Petri nets Methodology for the Design and Control of Migration Processes towards Industry 4.0. 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). 2018. P. 540-545. doi: 10.1109/ICPHYS.2018.8390763.
24. Information Integration and Web-based Applications & Services (iiWAS2018). ACM, New York. NY, USA. 2018. 183-189. DOI: <https://doi.org/10.1145/3282373.3282375>.
25. Gernhardt B., Vogel T. & Hemmje M. Knowledge-Based Production Planning for Industry 4.0. Springer-Verlag GmbH Germany: Hoppe et al. (eds.), *Semantic Applications*. 2018. T. 181. P. 181-202.
26. Dymola for physical modelling and simulation using Modelica. Claytex, 2017. Available at <http://www.claytex.com/products/dymola/> [Accessed 20 Apr. 2025].
27. Information Resources Management Association. The Internet of Things: Breakthroughs in Research and Practice / Information Resources Management Association. Hershey: IGI Global, 2017. 560 pp.
28. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). 2016. Pp. 3928-3937.
29. Бакаєв О.О., Гриценко В.І., Бажан Л.І. Економіко-математичні моделі економічного зростання. К.: Наук. думка, 2005. 189 с.
30. Беляков К.І. Інформатизація в Україні: проблеми організаційного, правового та наукового забезпечення: монографія. К.: КВІЦ, 2008. 576 с.

31. Вишневецький В. П., Вісцька О. В., Гаркушенко О. М., Князев С. І., Лях О. В., Чекіна В. Д., Череватський Д. Ю. Смарт-промисловість в епоху цифрової економіки: перспективи, напрями і механізми розвитку: монографія; В. П. Вишневецький (заг. ред.) / НАН України, Ін-т економіки пром-сті. Київ, 2018. 192 с.
32. Мадих А.А., Охтеня О.О., Дасів А.Ф. Моделирование фактора цифровизации производства в процессе становления смарт-промисловости (на примере переработки промышленности Германии): научно-аналитическая доповідь / НАН України, Ін-т економіки пром-сті. К., 2018. 41 с.
33. Vallespir B., Ducq Y. Enterprise modelling: from early languages to models transformation. *International Journal of Production Research*. 2018. 43(20). P. 2878-2896.
34. Wiśniewski J., Wiśniewski Z. The Purchasing Power Parity: Theory and Evidence. Warsaw: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 76 pp.
35. Álvares A.J., Santos de Oliveira L.E. & Espindola Ferreira J.C. Development of a Cyber-Physical framework for monitoring and teleoperation of a CNC lathe based on MTconnect and OPC protocols. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2018. 31 (11). Pp. 1049-1066.
36. Jeona B., Suh S.-H. Design Considerations and Architecture for Cooperative Smart Factory: MAPE/BD Approach. *Procedia Manufacturing*. 2018. № 26. Pp. 1094-1106.
37. Jeschke S., Brecher C., Song H., Rawat D.B. Industrial Internet of Things. Cybermanufacturing Systems. Herausgeber: Springer International Publishing Switzerland, 2017. 715 p.
38. Аулін В.В., Гриньків А.В. Вирішення проблеми підвищення експлуатаційної надійності з використання елементів інформаційних технологій. *Крамаровські читання: зб. матеріалів доп. учасн. VI Міжнародної науково-технічної конф.* Київ : НУБіП. 2019. С. 91-94.
39. Digital IIoT report. CFE Media. Available at: <http://bt.editionsbyfry.com/publication/?i=320036#> [Accessed 20 Apr.2017].
40. Hilliard J.E., Lawson L.R. Stereology and Stochastic Geometry: computational Imaging and Vision. Springer, 2003. 512 pp.
41. Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing. Institute for Defense Analyses. IDA Paper. March 2012.
42. Madykh, A.A., Okhten, O.O., Dasiv, A.F. Analysis of the world experience of economic and mathematical modeling of smart enterprises. *Econ. promisl.* 2017. 4 (80). Pp. 19-46.

References

1. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., & Holovaty, A. O. (2020). Kiberfizychniy pidkhid pry stvorenni, funktsionuvanni ta udoskonalenni transportno-vyrobnychkyh system. *Tsentralkoukrayins'kyi naukovy visnyk. Tekhnichni nauky*, 3(34), 331–343 [in Ukrainian].
2. Vyshnevskiy, V. P., Viets'ka, O. V., Viets'kyi, O. A., ta in., (Eds.). (2019). *Smart-promyslovist': napriamy stanovlennya, problemy i rishennya* [Monografiya]. NAN Ukrayiny, Instytut ekonomiky prom-sti. Kyiv [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., Holovaty, A. O., ta in., (Eds.). (2020). *Metodolohichni osnovy proektuvannya ta funktsionuvannya intelektual'nykh transportnykh i vyrobnychkyh system* [Monografiya]. Kropyvnyts'kyi: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., & Holovaty, A. O. (2020). Intelektual'ni transportni systemy yak rezultat vprovadzhennya innovatsiynykh efektyvnykh tekhnolohiy. In *Pidvyshchennya nadiynosti mashyn i obladnannya. Increase of Machine and Equipment Reliability: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konf., 15-17 kvitnya 2020 r.* (p. 207). Kropyvnyts'kyi: TsNTU [in Ukrainian].
5. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., Lysenko, S. V., Holovaty, A. O., & Holub, D. V. (2021). *Teoretychni i metodolohichni osnovy lohistyky transportnykh i vyrobnychkyh system* [Monografiya]. Kropyvnyts'kyi: Vydavets' Lysenko V. F. [in Ukrainian].
6. Asotsiatsiya Pidpryemstv Promyslovoyi Avtomatyzatsiyi Ukrayiny. (n.d.). Bar'ery ta perspektyvy IIoT ta Industriyi 4.0. <http://appau.org.ua/Baryery-i-perspektivy-IIoT-i-Industriyi-4-0.html> (Accessed May 20, 2025) [in Ukrainian].
7. Kovalenko, I. I., & Bondarenko, S. V. (2020). *Tsifrovi tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*. NTMT [in Ukrainian].
8. Indus, M. P., & Levchenko, O. V. (2019). *Matematychnye modelyuvannya tekhnichnykh system*. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].
9. Ivanova, M. I. (2017). *Naukovi zasady upravlinnya lohistychnymy systemamy na promyslovykh pidpryemstvakh* [Monografiya]. Dnipro: Hrani. (Klas. pryv. un-t) [in Ukrainian].
10. Germany Trade & Invest. (2018). *Industrie 4.0*. Retrieved from <https://www.gtai.de/GTAI/Navigation/EN/Invest/Industries/Industrie-4-0/Industrie-4-0/industrie-4-0-what-is-it.html> (Accessed April 20, 2025) [in English].
11. Camarinha-Matos, L. M., Parreira-Rocha, M., & Ramezani, J. (Eds.). (2017). *Technological innovation for smart systems: 8th IFIP WG 5.5/SOCOLNET Advanced Doctoral Conference in Computing, Electrical and Industrial Systems: DoCEIS 2017 (Costa de Caparica, Portugal, May 3-5, 2017)*. IFIP International Federation for Information Processing: Springer [in English].

12. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., Lysenko, S. V., Livitskyi, O. M., ta in. (2020). Printsypy pobudovy ta funktsionuvannya kiberfizychnoi systemy tekhnichnoho servisu avtotransportnoi ta mobilnoi sil'skohozyaystvens'koi tekhniky. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv Technical service of agriculture, forestry and transport systems*, 22, 162–174 [in Ukrainian].
13. Brynjolfsson, E., & McElheran, K. (n.d.). Data in action: Data-driven decision making in U.S. manufacturing. Retrieved from http://www.economics.cornell.edu/sites/default/files/files/events/Brynjolfsson_McElheran_AEA_2016.pdf (Accessed April 20, 2025).
14. Cachada, A., Pires, F., Barbosa, J., Leitão, P., & Calà, A. (2018). Petri nets methodology for the design and control of migration processes towards Industry 4.0. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 540–545.
15. Cheng-Leong, A., Li, Pheng, K., & Keng Leng, G. R. (1999). IDEF: A comprehensive modelling methodology for the development of manufacturing enterprise systems. *International Journal of Production Research*, 37(17), 3839–3858.
16. De Sousa, V. M., & Del Val Cura, L. M. (2018). Logical design of graph databases from an entity-relationship conceptual model. In *Proceedings of the 20th International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services (iiWAS2018)* (pp. 183–189). ACM.
17. Digitale Wirtschaft und Gesellschaft Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2018). Retrieved from <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html> (Accessed April 20, 2025) [in German].
18. Xu, X. (2017). Machine tool 4.0 for the new era of manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1893–1900.
19. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). *Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems*. Springer.
20. Zhang, Y., Ren, S., & Liu, Y. (2017). A framework for smart production-logistics systems based on CPS and industrial big data. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(9), 4019–4032 [in English].
21. Haidai, O. P. (2021). Internet rechey u vyrobnytstvi: mozhlyvosti ta perspektyvy. *Visnyk NTUU "KPI"*, (2), 45–52.
22. Auschitzky, E., Hammer, M., & Rajagopaul, A. (n.d.). How big data can improve manufacturing. McKinsey. Retrieved from <http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/ourinsights/how-big-data-can-improve-manufacturing> (Accessed April 20, 2025).
23. Cachada, A., Pires, F., Barbosa, J., Leitão, P., & Calà, A. (2018). Petri nets methodology for the design and control of migration processes towards Industry 4.0. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 540–545. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390763>.
24. Information Integration and Web-based Applications & Services (iiWAS2018). (2018). ACM. <https://doi.org/10.1145/3282373.3282375>.
25. Gernhardt, B., Vogel, T., & Hemmje, M. (2018). Knowledge-based production planning for Industry 4.0. In Hoppe, U., et al. (Eds.), *Semantic applications* (Vol. 181, pp. 181–202). Springer-Verlag GmbH Germany.
26. Claytex. (2017). *Dymola for physical modelling and simulation using Modelica*. Retrieved from <http://www.claytex.com/products/dymola/> (Accessed April 20, 2025).
27. Information Resources Management Association. (2017). *The internet of things: Breakthroughs in research and practice*. Hershey, PA: IGI Global.
28. Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios. In *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* (pp. 3928–3937).
29. Bakayev, O. O., Hrytsenko, V. I., & Bazhan, L. I. (2005). *Ekonomiko-matematychni modeli ekonomichnoho zrostantnya*. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
30. Belyakov, K. I. (2008). *Informatsiya v Ukraini: problemy orhanizatsiinoho, pravovoho ta naukovoho zabezpechennya: monohrafiya*. Kyiv: KVITs [in Ukrainian].
31. Vyshnevskiy, V. P., Viietska, O. V., Harkushenko, O. M., Knyaziev, S. I., Liakh, O. V., Chekina, V. D., & Cherevatskyi, D. Yu. (2018). *Smart-promyslovist v epokhu tsyfrovoyi ekonomiky: perspektyvy, napriamy i mekhanizmy rozvytku: monohrafiya* (V. P. Vyshnevskiy, Ed.). Kyiv: NAN Ukrainy, Instytut ekonomiky prom-sti [in Ukrainian].
32. Madykh, A. A., Okhten, O. O., & Dasiv, A. F. (2018). *Modeliuvannya faktorov tsyfrovyzatsii vyrobnytstva v protsesi stanovlennia smart-promyslovosti (na prykladi pererobnoi promyslovosti Nimechchyny): nauko-analitychna dopovid* [Scientific-analytical report]. Kyiv: NAN Ukrainy, Instytut ekonomiky prom-sti [in Ukrainian].
33. Vallespir, B., & Ducq, Y. (2018). Enterprise modelling: From early languages to models transformation. *International Journal of Production Research*, 43(20), 2878–2896.
34. Wiśniewski, J., & Wiśniewski, Z. (2014). *The purchasing power parity: Theory and evidence*. Warsaw: LAP LAMBERT Academic Publishing.
35. Álvares, A. J., Santos de Oliveira, L. E., & Espindola Ferreira, J. C. (2018). Development of a cyber-physical framework for monitoring and teleoperation of a CNC lathe based on MTconnect and OPC protocols. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(11), 1049–1066.

36. Jeon, B., & Suh, S.-H. (2018). Design considerations and architecture for cooperative smart factory: MAPE/BD approach. *Procedia Manufacturing*, 26, 1094–1106.
37. Jeschke, S., Brecher, C., Song, H., & Rawat, D. B. (Eds.). (2017). *Industrial internet of things: Cybermanufacturing systems*. Springer International Publishing.
38. Aulin, V. V., & Hryn'kiv, A. V. (2019). Vyrishennia problemy pidvyshchennia ekspluatatsiynoyi nadiynosti z vykorystanniam elementiv informatsiynykh tekhnolohiy [Resolving the problem of increasing operational reliability using information technology elements]. *Kramarovski chytannia: zb. materialiv dop. uchasyukiv VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konf.* Kyiv: NUBiP, 91–94 [in Ukrainian].
39. CFE Media. (2017). *Digital IIoT report*. Retrieved from <http://bt.editionsbyfry.com/publication/?i=320036#> (Accessed April 20, 2017).
40. Hilliard, J. E., & Lawson, L. R. (2003). *Stereology and stochastic geometry: Computational imaging and vision*. Springer.
41. Institute for Defense Analyses. (2012). *Emerging global trends in advanced manufacturing* (IDA Paper). March.
42. Madykh, A. A., Okhten, O. O., & Dasiv, A. F. (2017). Analysis of the world experience of economic and mathematical modeling of smart enterprises. *Ekon. promisl.*, 4(80), 19–46.

Artem Holovatyi, Viktor Aulin, Prof., DSc., Vitalii Chumak, Yehor Manko, Daria Kuleva, PhD
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improving Mathematical Modeling of Engineering Technologies for Smart Enterprises in a Machine Vision System

The article considers the issue of mathematical modeling of machine-building technologies of machine vision systems in the context of the transition to smart enterprises, which are the basis of modern Industry 4.0. It is noted that traditional approaches to modeling do not fully meet the requirements of digital production, which is characterized by high dynamism, the need for integration with cyber-physical systems, Internet of Things (IoT) technologies and adaptive control in real time.

It is shown that modeling of machine-building technologies at a smart enterprise as a formalized approach is based on the specification of subsystems and a set of factors. The characteristics of mathematical models that can describe production processes at the enterprise with sufficient accuracy are given. In this case, the specifics of the structure, composition, key functional purposes and engineering, economic and its software and hardware aspects, as well as the conditions of machine-building production in accordance with the concept of a cyber-physical system, are taken into account.

It is determined that according to the cyber-physical approach, the degree of automation of technological equipment varies from basic to high-level solutions. This requires modeling of production processes and technologies and the construction of mathematical models and their parameterization for further use in network interaction conditions when creating smart production and smart enterprises. It is found out that this requires the use of a machine (technical vision) system to ensure automation of product (service) quality control processes and management by processing and interpreting the information system.

The possibilities of implementing a machine vision system at machine-building enterprises are identified. In this regard, such an artificial intelligence method as artificial neural networks is considered. The tasks in machine (technical) vision systems using the artificial neural network method are formulated. The advantages of this method in digital production and smart enterprises are determined.

The integration of machine vision with robotic systems is clarified. A number of functions of the "machine vision-robot" complex and the possibilities of controlling the movement of robots during the task of controlling robotic platforms using a model of various types of artificial neural networks have been determined. The structure of an intelligent control system for robotic and mechatronic systems with a number of functional modules has been developed. An automated complex for the manufacture and assembly of parts and machines, intelligent production systems, have been considered at a smart enterprise. The functionality of intelligent production systems is based on modeling using mass service systems. Multiphase single- and multi-channel mass service systems are considered. The possibilities of models of automated production systems and the use of multi-level computer models in SCADA systems have been determined. The effectiveness of the created smart enterprises on the platform of a cyber-physical system and their integration into a single network of production systems of mechanical engineering have been shown. This involves the use of various automated design systems, technological preparation of production, a single database that will have a data management system about the manufacturer and mathematical modeling of advanced mechanical engineering technologies at smart enterprises.

mechanical engineering technology, production, machine (technical) assembly, cyber-physical system, smart enterprise, mathematical modeling, optimization, intelligent control, artificial neural network

Одержано (Received) 19.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 22.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.05.2025

УДК 621.891

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.160-168](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.160-168)

О. Л. Ляшук, проф., д-р техн. наук, **О. П. Цьонь**, доц., канд. техн. наук, **О. А. Юр'єв**,
С. М. Паньків, **Г. Б. Цьонь**, канд. техн. наук

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: kaf_am@ukr.net*

Синтез гальмівних елементів муфт двосторонньої дії для гвинтових конвеєрів

У статті розглянуто проблему підвищення надійності та захисту гвинтових конвеєрів шляхом удосконалення конструкції запобіжної муфти двосторонньої дії. Запропоновано нову конструкцію муфти, яка забезпечує захист робочих органів від перевантажень та дозволяє реверсне провертання у випадках заклинювання. Основну увагу приділено автоматизованому синтезу послідовностей збирання вузла на основі «зворотного» методу, що передбачає моделювання процесу розбирання з подальшим інвертуванням. Застосовано бінарне відношення обмеження рухливості (БВОР) для формалізації просторових зв'язків між деталями у вигляді матриць. Розроблено програмне забезпечення з інтеграцією в середовище CAD (SolidWorks), яке дозволяє автоматично генерувати математичну модель виробу та формувати оптимальну технологію збирання. Результати дослідження підтверджують ефективність запропонованого підходу для проектування складальних вузлів і технологій збирання у сучасному машинобудуванні.

гвинтовий конвеєр, запобіжна муфта, гальмівний елемент, зворотний синтез, CAD-моделювання, SolidWorks

Постановка проблеми. У процесі експлуатації гвинтових конвеєрів виникає низка серйозних експлуатаційних проблем, пов'язаних із защемленням або заклинюванням транспортованого матеріалу в зазорі між гвинтовим робочим органом і нерухомим кожухом. Це може призводити до пошкодження матеріалу (особливо зернових культур), поломки робочих вузлів, зниження продуктивності та повного виходу з ладу механізму. Сучасні методи захисту приводів конвеєрів не завжди забезпечують достатню надійність, особливо при необхідності реверсного руху робочого органу. Актуальною стає розробка конструктивно простих, технологічно ефективних та надійних засобів захисту, здатних не лише запобігати руйнуванням при перевантаженнях, а й реалізовувати реверсивне провертання при заклинюванні. Крім того, існує потреба в автоматизованих методах моделювання та синтезу технології збирання таких складальних вузлів, що забезпечували б високу точність і зменшення трудомісткості на етапі проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика захисту гвинтових конвеєрів від перевантажень та заклинювань привертає значну увагу дослідників, оскільки ефективна робота таких систем безпосередньо впливає на надійність технологічних процесів у сільському господарстві та промисловості. Вагомий внесок у розвиток тематики зробили вітчизняні дослідники, зокрема І.Б. Гевко, А.Є. Дячун, О.Л. Ляшук та інші.

У роботі [1] автори провели аналіз пар контакту гальмівних елементів муфти двосторонньої дії. Результати дослідження дали змогу визначити конструктивні та матеріальні параметри, які забезпечують надійне фрикційне зчеплення при різних режимах роботи. Особливу увагу приділено вибору матеріалів і характеристикам зносу фрикційних елементів. У науковій публікації [2] представлено вдосконалену конструкцію муфти обгону двосторонньої дії, що поєднує функції захисту від перевантаження та можливість реверсивного обертання. Описано принцип роботи механізму, подано схеми взаємодії елементів, підтверджено ефективність розробки експериментальними дослідженнями.

© О. Л. Ляшук, О. П. Цьонь, О. А. Юр'єв, С. М. Паньків, Г. Б. Цьонь, 2025

Булгаков В.М. та Троханяк О.М. у роботі [3] акцентували увагу на вдосконаленні запобіжних механізмів шнекових конвеєрів, що працюють у важких експлуатаційних умовах. У статті розглянуто конструкції із застосуванням пружних елементів, які адаптуються до динамічних змін навантаження. У дослідженні Малащенко В.О. та ін. [4] проаналізовано параметри кулькових обгінних муфт двосторонньої дії. Наведено аналітичну модель муфти та результати моделювання її поведінки при змінних крутних моментах, що дозволяє обґрунтовано вибирати геометрію і жорсткість елементів муфти.

У роботі [5] автори представили результати експериментального дослідження інерційної запобіжної муфти для гвинтового конвеєра. Авторами підтверджено ефективність використання інерційного принципу як механізму захисту від перевантажень та описано особливості конструкції. У публікації [6] розглянули роботу гнучких шнекових транспортерів при транспортуванні сипких сільськогосподарських матеріалів. Досліджено силові й енергетичні параметри роботи системи, а також запропоновано напрямки вдосконалення приводів з урахуванням динаміки навантажень. У статті [7] досліджено віброактивність зубчастих передач, поєднаних із високофлексибельною металевією муфтою. Це дозволяє зробити висновки щодо придатності подібних рішень для систем із високим навантаженням і нестабільними умовами експлуатації.

У роботі [8] Zhao et al. запропоновано концепцію нової обгінної муфти, здатної передавати силу у зворотному напрямку при високих швидкостях обертання. Цей підхід може мати практичне значення для створення муфт із двосторонньою дією в автоматизованих механізмах.

Здійснений огляд свідчить про активний розвиток наукових досліджень у сфері муфт двосторонньої дії та захисних механізмів для шнекових транспортерів. Водночас залишається актуальним завдання інтеграції теоретичних моделей із сучасними засобами автоматизованого проектування, зокрема із застосуванням CAD/CAM-технологій для моделювання та синтезу гальмівних елементів і вузлів підвищеної надійності.

Постановка завдання. Незважаючи на наявність значної кількості конструкцій захисних муфт, які застосовуються в приводах гвинтових конвеєрів, більшість із них орієнтовані на односторонню дію, не забезпечують реверсного провертання при заклинюванні шнека, або вимагають ручного втручання в процес розблокування. У реальних умовах експлуатації, особливо під час транспортування сипких або кускових матеріалів, конвеєри піддаються нерівномірним навантаженням, що може спричинити аварійні ситуації та простої обладнання. Існує потреба в розробці муфти, яка одночасно поєднує функції запобіжного зчеплення та забезпечує двосторонню дію із можливістю автоматичного реверсу при блокуванні робочого органу.

Крім того, в умовах сучасного виробництва важливим завданням є автоматизація процесів проектування та складання таких складальних одиниць. Сучасні CAD/CAM системи дають змогу моделювати тривимірну геометрію виробу, але не забезпечують повної автоматизації синтезу технологічної послідовності збирання. Це вимагає залучення додаткових підходів і розробки алгоритмів формалізації, зокрема на основі зворотного синтезу та бінарного відношення обмеження рухливості (БВОР).

Отже, мета дослідження полягає в розробці конструкції муфти обгону двосторонньої дії для гвинтового конвеєра, яка забезпечуватиме захист приводу від перевантажень і можливість реверсивного провертання, а також у створенні методики автоматизованого синтезу процесу збирання цієї муфти з використанням CAD-моделювання, зворотного підходу та матричних описів БВОР.

Виклад основного матеріалу. Однією з основних проблем, які виникають при функціонуванні гвинтових конвеєрів є защемлення транспортованого сипкого матеріалу в зазорі між обертовою гвинтовою поверхнею робочого органу та нерухомою внутрішньою поверхнею направляючого кожуха. Так, при переміщенні сипких

матеріалів сільськогосподарського виробництва це призводить до їх пошкодження та дроблення, що є недопустимим для переважної більшості таких матеріалів, особливо насіннєвих. При транспортуванні твердих кускових матеріалів досить часто відбувається заклинювання гвинтового робочого органу, що призводить до поломок вузлів транспортерів, і як наслідок, зниження продуктивності в процесі виконання завантажувально розвантажувальних робіт. Для усунення даних недоліків розроблені різні конструкції захисних механізмів, які забезпечують відносно повертання ведучих елементів приводів відносно ведених при виникненні перевантаження або надання заклиненням гвинтовим робочим органам реверсного повертання для вивільнення останніх із зони защемлення.

Розглянемо об'єкт дослідження, муфту обгону двосторонньої дії зображено на рисунку 1. Муфта обгону виконана у вигляді приводної зірочки 1, до якої в центрі жорстко закріплена зовнішня обойма 2, всередині якої встановлено підшипник кочення 3 з обмежувальними стопорними кільцями 4 в центральному отворі. Підшипник внутрішнім отвором жорстко встановлено на приводний вал 5 і закріплений стопорним кільцем 4. На проміжний зовнішній діаметр 6 приводної зірочки 1 встановлено стакан 7, який закріплений болтами 8. Між приводною зірочкою 1 і стаканом 7 встановлено розрізний на три частини циліндричний гальмівний сектор 9 з вмонтованими на їх торцях пружинами розтиску 10.

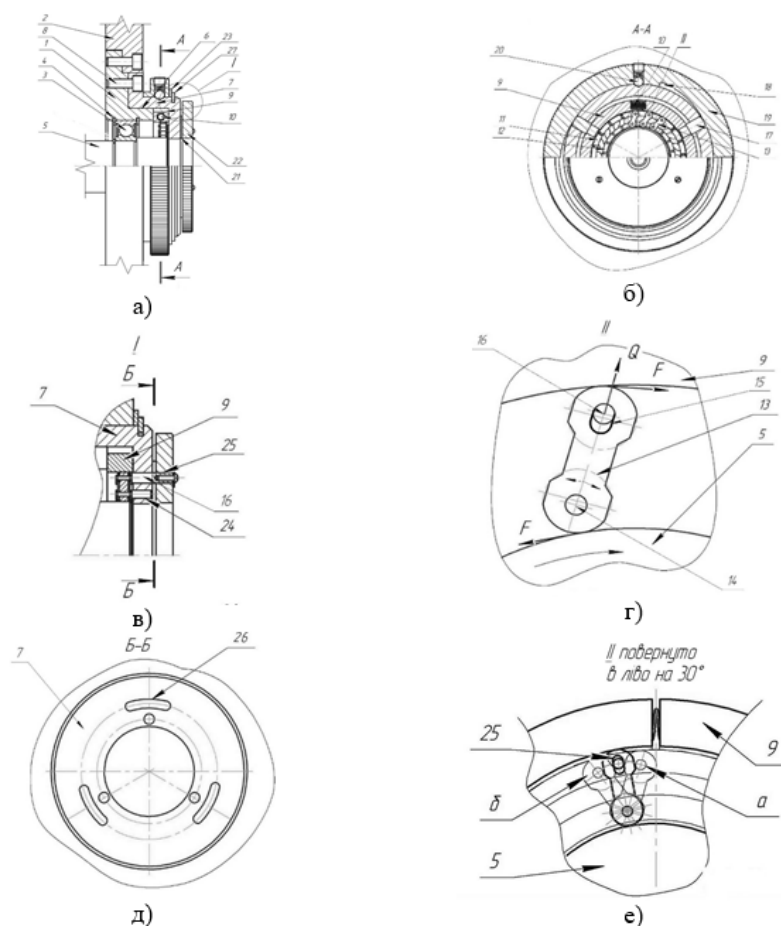


Рисунок 1 – Муфта обгону двосторонньої дії

Джерело: розроблено авторами

Дослідимо процес збирання запропонованої муфти. Маніпулювання з моделями виробів – прерогатива математичних моделей процесу проектування технології. Тут досить добре спрацює системний підхід.

Пасічником В.А. було запропоновано метод автоматизованого синтезу послідовностей збирання, який отримав назву „зворотного”. Його основною перевагою стала лінійна залежність кількості арифметичних операцій від числа деталей виробу. Це одна із найважливіших особливостей, що дозволяє аналізувати конструкції практично будь-якої складності (відомі методи синтезу дозволяють розглядати збирання до $15 \div 20$ деталей, оскільки складність обчислюваної задачі для них є степеневою залежністю від n). Ідея визначення технічно допустимої ПЗ полягає у тому, що для ЗВ, який є ієрархічним структурованим об’єктом зі вкладеним одна в одну збиральними одиницями, спочатку моделюється процес їх розбирання, при якому гарантовано виконуються всі умови доступу деталей в зону збирання, після чого інвертуванням може бути отримана ПЗ.

Ілюстрацію процесу „зворотного” синтезу розкладання-збирання запобіжної муфти двосторонньої дії, тривимірна модель якої подана на рисунку 2, приведено на рисунку 3.

Застосування бінарного відношення обмеження рухливості – БВОР приведено в таблицях А.1 – А.29. Параметри просторового положення деталей у вигляді БВОР позначені: «1» – фізичний контакт між деталями, «2» – з’єднання, що забезпечує цілісність, «8» – обмеження на деякій відстані.

Вигляд матриці БВОР для першого і останнього переходу розбирання-збирання ЗМ показано на рисунках 4, 5.

Тривимірна модель сепаратора в зборі показана на рисунку 6 а застосування „зворотного” синтезу для його розкладання-складання приведено на рисунку 7.

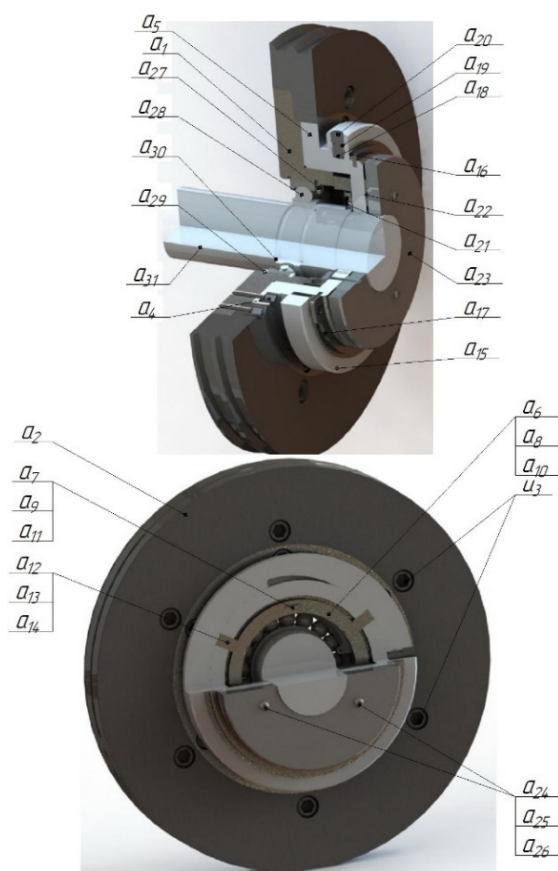


Рисунок 2 – Тривимірна модель запобіжної муфти двосторонньої дії

Джерело: розроблено авторами

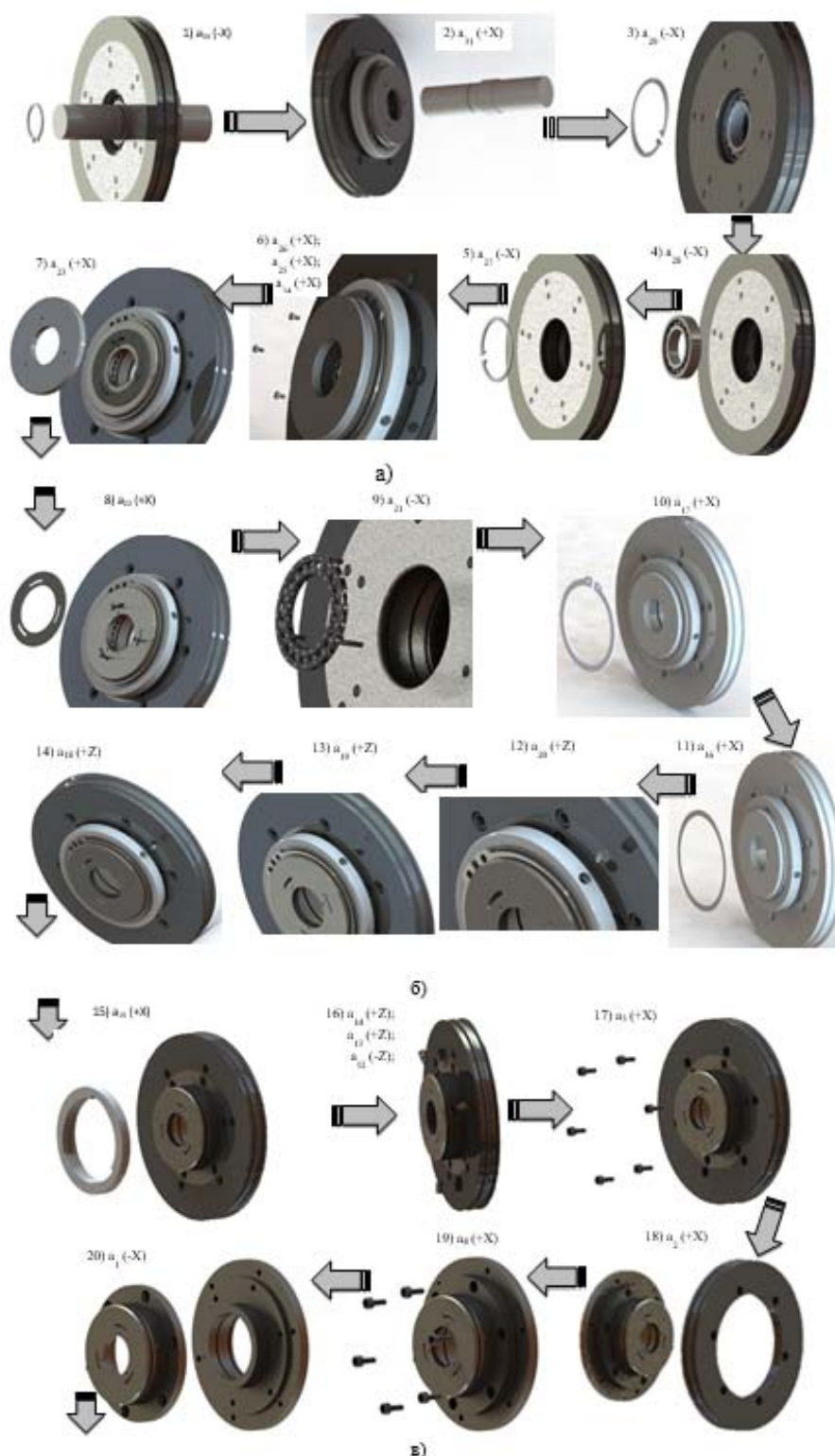


Рисунок 3 – Застосування „зворотного” синтезу для розкладання-збирання:

а) розкладання: $a_{30}(-X) \rightarrow a_{31}(+X) \rightarrow a_{29}(-X) \rightarrow a_{28}(-X) \rightarrow a_{27}(-X) \rightarrow a_{26}(+X) \rightarrow a_{25}(+X) \rightarrow a_{24}(+X) \rightarrow a_{23}(+X) \rightarrow$ збирання: $\leftarrow a_{23}(-X) \leftarrow a_{24}(-X) \leftarrow a_{25}(-X) \leftarrow a_{26}(-X) \leftarrow a_{27}(+X) \leftarrow a_{28}(+X) \leftarrow a_{29}(+X) \leftarrow a_{31}(-X) \leftarrow a_{30}(+X)$; б) розкладання: $\rightarrow a_{22}(+X) \rightarrow a_{21}(-X) \rightarrow a_{17}(+X) \rightarrow a_{16}(+X) \rightarrow a_{20}(+Z) \rightarrow a_{19}(+Z) \rightarrow a_{18}(+Z) \rightarrow$ збирання: $\leftarrow a_{18}(-Z) \leftarrow a_{19}(-Z) \leftarrow a_{20}(-Z) \leftarrow a_{16}(-X) \leftarrow a_{17}(-X) \leftarrow a_{21}(+X) \leftarrow a_{22}(-X) \leftarrow$; в) розкладання: $\rightarrow a_{15}(+X) \rightarrow a_{14}(+Z) \rightarrow a_{13}(+Z) \rightarrow a_{12}(-Z) \rightarrow a_3(+X) \rightarrow a_2(+X) \rightarrow a_4(+X) \rightarrow a_1(-X) \rightarrow$ збирання: $\leftarrow a_1(+X) \leftarrow a_4(-X) \leftarrow a_2(-X) \leftarrow a_3(-X) \leftarrow a_{12}(+Z) \leftarrow a_{13}(-Z) \leftarrow a_{14}(-Z) \leftarrow a_{15}(-X) \leftarrow$; г) розкладання: $\rightarrow a_{10}(-X) \rightarrow a_{11}(-X) \rightarrow a_9(-X) \rightarrow a_8(-X) \rightarrow a_7(-X) \rightarrow a_6(-X)$; збирання: $a_6(+X) \leftarrow a_7(+X) \leftarrow a_8(+X) \leftarrow a_9(+X) \leftarrow a_{11}(+X) \leftarrow a_{10}(+X) \leftarrow$

Джерело: розроблено авторами

M _x	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈	a ₁₉	a ₂₀	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃	a ₂₄	a ₂₅	a ₂₆	a ₂₇	a ₂₈	a ₂₉	a ₃₀	a ₃₁
a ₁	1	2	2	1											8	8	8				8	8	8	8	8	8	2	2	2	2	8
a ₂			1		1										8	8	8				8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₃				1											8	8	8				8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₄		8	8		1										8	8	8				8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₅	1	1	8	1		1	8	1		1		1	1	1	1	1	2	1			1	1	8	8	8	8	8	8	8	8	1
a ₆	1	8	8	8	1					1	1				8	8	8				1	8	8	1	1	1	8	8	8	8	8
a ₇	8	8	8	8	8	1		1							8	8	8				8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₈	1	8	8	8	1				1				1		8	8	8				1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₉	8	8	8	8	8			1		1					8	8	8				8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₁₀	1	8	8	8	1				1		1			1	8	8	8				1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₁₁	8	8	8	8	8	1				1					8	8	8				8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₁₂					1										8	8	8				8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₁₃				1											8	8	8				8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₁₄				1											8	8	8				8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₁₅				1											1	8	8	1	1	1	1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₁₆				1												1					8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₁₇				2																	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₁₈				1														1			8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₁₉				8															1		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₂₀				8																	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
a ₂₁				1																		8	8	8	8	8	8	8	8	8	1
a ₂₂				1																			1	1	1	1	8	8	8	8	8
a ₂₃				8																				1	1	1	8	8	8	8	8
a ₂₄				8																				8	8	8	8	8	8	8	8
a ₂₅				8																					8	8	8	8	8	8	8
a ₂₆				8																						8	8	8	8	8	8
a ₂₇				8																								1	8	8	8
a ₂₈				8																									1	1	2
a ₂₉				8																										8	8
a ₃₀				8																											
a ₃₁				1																										2	

Рисунок 4 – Вигляд матриці БВОР для першого переходу розбирання-збирання

Джерело: розроблено авторами

M _x	a ₅	a ₆
a ₅		1
a ₆	1	

Рисунок 5 – Вигляд матриці БВОР для останнього переходу розбирання-збирання

Джерело: розроблено авторами

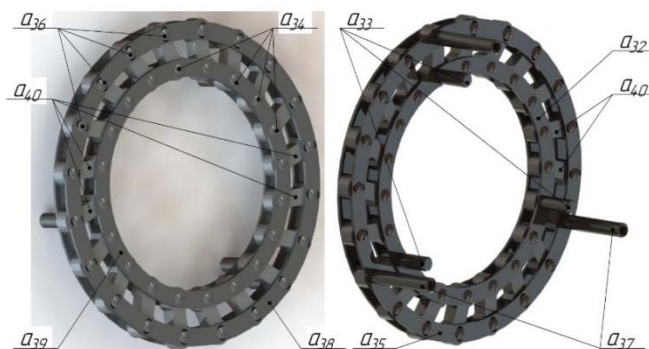


Рисунок 6 – Тривимірна модель сепаратора в зборі

Джерело: розроблено авторами

Зазначимо, що інформації лише про факт обмеження можливого переміщення деталей недостатньо для створення самих збиральних одиниць. Адже для збирання окрім наявності контакту однієї деталі з іншою потрібно враховувати їх з'єднання. Тому виникає необхідність у використанні додатково функції F_p яка ставить у відповідність парі деталей певний тип з'єднання. З точки зору технічної реалізації це можуть бути пресові з'єднання, різбові чи зварні з'єднання, однак з точки зору їх представлення в математичній моделі, всі вони мають одну загальну властивість – це з'єднання, що забезпечують цілісність (ЗЦІ) структурної одиниці.

Починаючи з моделі ЗВ розробка технології має виконуватись САМ системою. Щоб зменшити час проектних робіт і попередити погіршення якості проектних рішень через неможливість оцінки їх повної множини та вибору найкращого варіанту, а також

звичайних помилок, потрібно виключити втручання технолога в ці системи. Тобто відмінити введення людиною вручну послідовність виконання операцій, щоб не розривався зв'язок CAD↔CAM.

Саме через це системи для вирішення слабоформалізованих технологічних задач виділено в окрему групу: CAPP – системи комп'ютерного проектування технологічних процесів при підготовленні виробництва.

Кінцевий результат проектування представляється у вигляді графів (або таких, що можуть бути зведені до графів) – свого роду аналогів традиційних схем збирання. Для вирішені питання автоматизованого введення та обробки інформації технологічного змісту (ресурси та час) необхідно вдосконалити програмне забезпечення.

Моделі технології носять головним чином табличний характер (рис. 7). Де модель виконання процесу з'єднання (установки елемента) задається у вигляді декартового добутку $T \times F$, тут $T = \{\tau_1, \dots, \tau_k\}$ – множина технологічних операторів, які характеризують процес виробництва (операції, переходи); F – поняття «контуру» як сукупності властивостей певного призначення у виробі або технологічній системі. Для описання технологічної системи S в цілому, вводиться множина операторів $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_j\}$, що характеризують матеріальні об'єкти (обладнання, інструмент, оснастку тощо). У такому випадку: $S = T \cup \Pi$, де τ_1 – свердління; τ_2 – зняття фаски; τ_3 – нарізання різі; τ_4 – установка шайби; τ_5 – установка гвинта; π_6 – свердло; π_7 – свердло; π_8 – мітчик; π_9 – інструмент для установки болта; τ_{10} – зенкерування; τ_{11} – точіння; τ_{12} – зняття фаски; τ_{13} – установка стопорного кільця; π_{14} – різець; π_{15} – різець прохідний; π_{16} – інструмент для установки стопорного кільця; τ_{18} – зняття фаски; τ_{19} – установка заклепки; τ_{20} – установка пальця 1; τ_{21} – установка пальця 2; π_{22} – фреза пальчикова; π_{23} – зенкер; π_{24} – свердло; π_{25} – інструмент для установки заклепки; π_{26} – інструмент для установки пальця 1; π_{27} – інструмент для установки пальця 2.

Матриця контурів: F_1 – отвору; F_2 – положення гвинта; F_3 – положення шайби; F_4 – різьбового отвору; F_5 – отвору; F_6 – положення болта; F_7 – різьбового отвору; F_8 – канавки; F_9 – положення стопорного кільця; F_{10} – отвору; F_{11} – отвору фасонного; F_{12} – положення заклепки; F_{13} – положення пальця 1; F_{14} – положення пальця 2.

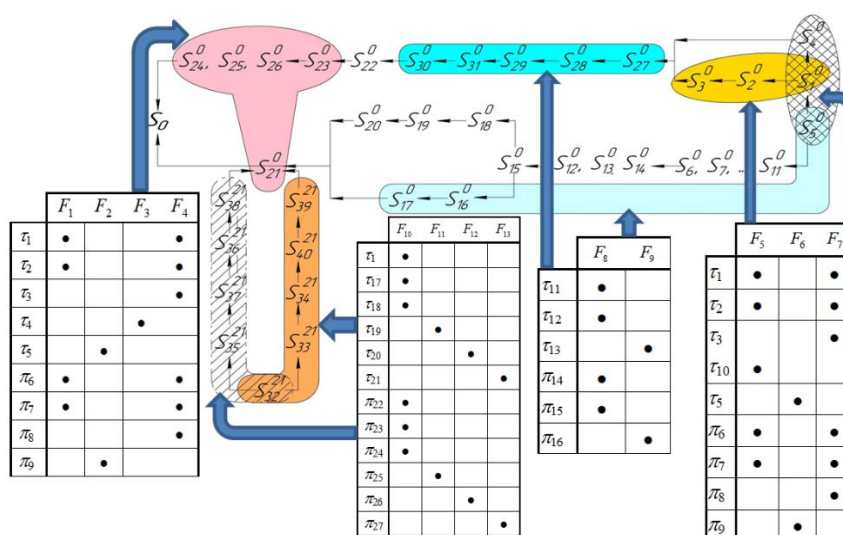


Рисунок 7 – Представлення результатів моделювання ТПЗ

Джерело: розроблено авторами

Для автоматизації формування математичної моделі ЗВ у вигляді БВОР на основі його 3D моделі (CAD-система, яка підтримує тривимірне моделювання,

SolidWorks) було розроблено нове програмне забезпечення. Інтерфейс CAD системи показаний на рисунку 8.

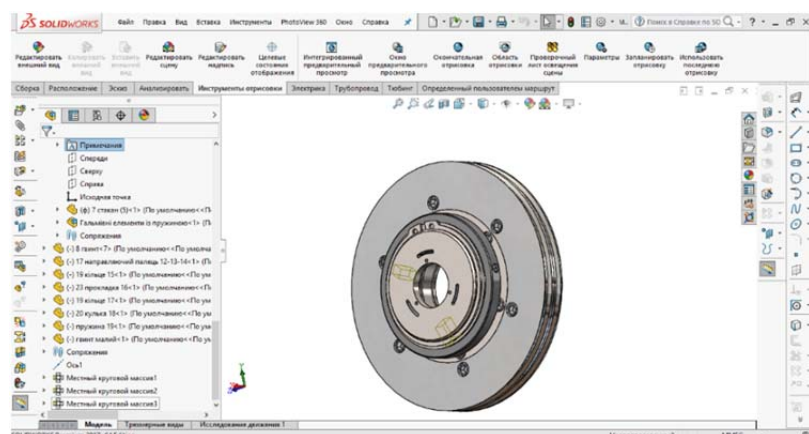


Рисунок 8 – Інтерфейс CAD системи

Джерело: розроблено авторами

Програмне забезпечення для автоматизованого формування математичної моделі муфти двосторонньої дії в вигляді відношень обмежень рухливості дозволило безпомилково виявляти всі значущі властивості складального виробу з його тривимірної моделі, створеної у середовищі SolidWorks, яка підтримує тривимірне моделювання.

Висновки:

1. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність застосування муфти обгону двосторонньої дії в приводах гвинтових конвеєрів, що дозволяє забезпечити ефективний захист робочих органів від перевантажень та реалізувати реверсивне повертання при заклинюванні.

2. Запропонована конструкція муфти з розрізними гальмівними секторами та пружинами розтиску забезпечує фрикційне зчеплення між ведучими та веденими елементами, а також дозволяє уникнути пошкодження транспортованого матеріалу й збоїв у роботі системи.

3. Застосування методу зворотного синтезу збирання на основі попереднього моделювання процесу розбирання дає змогу автоматично сформувати технічно допустиму послідовність складання навіть для складних вузлів.

4. Використання бінарного відношення обмеження рухливості (БВОР) дозволяє формалізувати просторові зв'язки між деталями у вигляді матриць, що значно спрощує процес автоматизації розробки технологічного процесу збирання.

5. Розроблене програмне забезпечення з інтеграцією в середовище SolidWorks дозволило автоматизувати отримання математичних моделей складання, скоротити час проектування та зменшити кількість помилок за рахунок виключення ручного програмування послідовності операцій.

6. Представлений підхід має широкі перспективи застосування в машинобудуванні для автоматизованого проектування технологій складання вузлів зі складною структурою та просторовими обмеженнями, зокрема для обладнання аграрного та промислового призначення.

Список літератури

1. Гевко І.Б., Дячун А.Є., Комар Р.В., Босюк П.В. Дослідження пар контакту гальмівних елементів муфти двосторонньої дії. *Сільськогосподарські машини*, 2014. С. 25–30.
2. Дячун А.Є., Дзюра В.О., Ляшук О.Л., Гевко І.Б. Муфта обгону двосторонньої дії. *Сільськогосподарські машини*, 2015. С. 45–50.
3. Булгаков В. М., Троханяк, О. М. Дослідження та вдосконалення запобіжних механізмів шнекових конвеєрів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 2023. Вип. 53. С. 23-31.

4. Малащенко В. О., Семенюк В. Ф., Лисяк Б. Р. Параметри кулькової обгінної муфт двосторонньої дії. *Підйомно-транспортна техніка*, 2023, №1(68) 87-94, DOI 10.15276/pidtt.1.68.2023.07
5. Karetin V., Stukhlyak P., Kurko A. Experimental studies of the inertial safety clutch for screw conveyor. *Scientific Journal of TNTU*. 2020. Vol 4. P. 86–96.
6. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Adamchuk, V., Nowak, J., Beloev, H. Research into Power and Load Parameters of Flexible Screw Conveyors for Transportation of Agricultural Materials. *Lecture Notes in Civil Engineering, Springer Nature Switzerland AG*, 2023, 289, 61–75. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13090-8_6.
7. K. Mariusz, N. Wieczorek, L. Konieczny. Research on vibroactivity of toothed gears with highly flexible metal clutch under variable load conditions. *Sensors*. (2022), 23 (1) 287.
8. Zhao, Huiyong & Wang, Baohua & Zhang, Guangde & Li, Jiao. Concept of a new overrunning clutch with the characteristic of reverse force transfer at high speed. *Engineering Reports*. (2021). 3. 10.1002/eng2.12415.

References

1. Hevko, I. B., Diachun, A. Ie., Komar, R. V. & Bosiuk, P.V. (2014). Study of contact pairs of braking elements of a double-acting clutch. *Agricultural machinery*, 25–30.
2. Diachun, A. Ie., Dziura V.O., Liashuk O.L. & Hevko I.B. (2015). Double-acting overrunning clutch. *Agricultural machinery*, 45–50.
3. Bulhakov, V. M. & Trokhaniak, O. M. (2023). Research and improvement of safety mechanisms of screw conveyors. *Design, production and operation of agricultural machinery*, 53, 23-31.
4. Malashchenko, V. O., Semeniuk, V. F. & Lysiak, B. R. (2023). Parameters of double-acting ball overrunning clutches. *Lifting and conveying equipment*, №1(68) 87-94, DOI 10.15276/pidtt.1.68.2023.07
5. Karetin, V., Stukhlyak, P. & Kurko A. (2020). Experimental studies of the inertial safety clutch for screw conveyor. *Scientific Journal of TNTU*, vol 4, 86–96.
6. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Adamchuk, V., Nowak, J., Beloev, H. (2023). Research into Power and Load Parameters of Flexible Screw Conveyors for Transportation of Agricultural Materials. *Lecture Notes in Civil Engineering, Springer Nature Switzerland AG*, 289, 61–75. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13090-8_6.
7. Mariusz, K., Wieczorek N., Konieczny, L. (2022). Research on vibroactivity of toothed gears with highly flexible metal clutch under variable load conditions. *Sensors*, 23 (1) 287.
8. Zhao, Huiyong & Wang, Baohua & Zhang, Guangde & Li, Jiao. (2021). Concept of a new overrunning clutch with the characteristic of reverse force transfer at high speed. *Engineering Reports*. 3. 10.1002/eng2.12415.

Oleg Lyashuk, Prof., DSc., **Oleg Tson**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Yuriev**, **Serhiy Pankiv**, **Anna Tson**, PhD tech. sci.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Synthesis of Double-Action Brake Elements for Screw Conveyors

The article presents the synthesis and design of braking elements for double-action overrun clutches intended for use in screw conveyors. The performance and reliability of such conveyors significantly depend on the appropriate configuration and accurate calculation of their key structural, kinematic, and dynamic parameters. A critical issue addressed is the jamming of bulk materials between the rotating screw surface and the stationary housing, which can lead to damage of transported goods, mechanical failures, and productivity losses.

To mitigate these problems, a novel design of a double-action overrun clutch with integrated cylindrical braking sectors is proposed. The clutch assembly includes a drive sprocket rigidly connected to an outer race, inside of which a rolling bearing is mounted on a drive shaft. Between the sprocket and an external cup, a segmented cylindrical braking element with expansion springs is installed. This configuration ensures controlled torque transfer and provides reverse rotation capability in case of screw jamming, allowing the conveyor system to self-release from overload conditions.

A key focus of the study is the implementation of automated assembly synthesis using the “reverse synthesis method” introduced by V.A. Pasichnyk. This approach models the disassembly process to derive feasible assembly sequences, significantly reducing computational complexity and enabling the analysis of assemblies with more than 30 parts. The method utilizes binary constraint matrices (BCOM) to represent mechanical relationships and constraints between components.

The process is integrated into a SolidWorks-based CAD/CAM environment, supported by custom-developed software that generates motion restriction maps and automates the identification of mechanical joints and contacts. The resulting models include 3D visualizations of the clutch and separator, detailed constraint tables, and assembly/disassembly graphs.

This methodology enhances the automation, precision, and efficiency of the mechanical design process. It is particularly valuable for conveyor system applications where rapid prototyping and simulation are essential for operational reliability and safety.

screw conveyor, safety clutch, braking element, reverse synthesis, CAD modeling, SolidWorks

Одержано (Received) 14.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 16.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

УДК 621.787.4

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.169-176](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.169-176)

І. В. Шепеленко, проф., д-р техн. наук, **А. М. Красота**, **В. І. Гуцул**, доц., канд. техн. наук,
М. В. Красота, доц. канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kntucpfzk@gmail.com*

Обґрунтування конструкції пристрою для обробки кулачків розподільних валів фрикційно-механічним методом

Аналіз традиційних схем нанесення антифрикційних покриттів фрикційно-механічним методом, а також пристроїв для їх здійснення, показав їх ефективність при обробці поверхонь деталей, що мають форму тіл обертання. Однак для обробки складних профільних поверхонь, до яких слід віднести кулачки розподільних валів, використання таких схем є неприйнятним через відсутність стабільного контакту інструменту з деталлю. Метою представленої роботи є обґрунтування конструкції та розробка пристрою для фінішної антифрикційної безабразивної обробки кулачків розподільного валу фрикційно-механічним методом. Визначені шляхи досягнення мети – забезпечення необхідної траєкторії руху інструменту або деталі, яка копіює форму кулачка та створює необхідні умови для якісної реалізації вибіркового перенесення антифрикційного матеріалу на робочу поверхню деталі. Запропоновано використання важільної схеми навантаження інструменту, яка забезпечує постійне зусилля тиску інструменту на поверхню кулачка з урахуванням його геометрії. Іншим підходом до вирішення зазначеної проблеми є використання конструкції пристосування, що містить копіювальний і натиральний вузли. Наявність копіїрів у запропонованому пристрої забезпечує створення зворотно-поступального і обертального руху інструмента за траєкторією, що відповідає формі кулачка, із необхідним стабільним зусиллям за всієї геометрії його профілю. Обґрунтування конструкції пристроїв дозволяють стверджувати про можливість забезпечення якісних умов для фінішної антифрикційної безабразивної обробки кулачків розподільного валу.
розподільний вал, автотракторний двигун, антифрикційне покриття, зносостійкість, фрикційно-механічний метод, важільна схема навантаження інструменту, копіювальний пристрій

Постановка проблеми. Сучасними тенденціями у виробництві та експлуатації машин є підвищення якості деталей за рахунок застосування науково-обґрунтованих, технічно доступних, екологічних та економічно доцільних технологій. Для деталей, які лімітують ресурс роботи двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), питання підвищення якості робочих поверхонь шляхом удосконалення їх обробки є особливо важливим і актуальним [1, 2].

До числа інноваційних технологій обробки слід віднести нанесення антифрикційних покриттів фінішною антифрикційною безабразивною обробкою (ФАБО), яка реалізується фрикційною взаємодією інструменту з антифрикційного матеріалу з поверхнею тертя деталі [3].

Для фрикційно-механічного нанесення покриттів розроблені та реалізовані спеціальні пристосування (пристрої), напівавтомати, автомати та верстати. Відмінність розмірів і конфігурацій деталей, що підлягають покриттю, обумовило застосування різних способів і пристроїв для їхнього здійснення [4].

На кафедрі експлуатація та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету протягом багатьох років виконуються комплексні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності застосування ФАБО деталей тертя. Серед найбільш вагомих отриманих результатів слід відзначити наступні:

- розробка технології фінішної обробки гільз циліндрів ДВЗ, що поєднує операції розкочування гільзи та нанесення на її поверхню антифрикційного мідного покриття [5];

- використання вібрації інструменту при нанесенні антифрикційних покриттів на зовнішні циліндричні поверхні на прикладі цапф шестерень гідронасосів (дослідження проводилися разом з науковцями Таврійського державного агротехнологічного університету ім. Дмитра Моторного) [6];

- розробка комбінованої технології обробки гільз циліндрів ДВЗ, при реалізації якої застосовано принцип протягування – інструмент з антифрикційним брусками здійснює зворотно-поступальний рух з одночасним дискретним обертанням деталі [7].

Запропоновані технології нанесення антифрикційних покриттів та інструменти для їх здійснення довели свою ефективність при обробці внутрішньої і зовнішньої поверхонь деталей, що мають форму тіла обертання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ФАБО поверхонь тертя використовується задля зниження інтенсивності зношування, підвищення зносостійкості, інтенсифікації процесів утворення «сервовітних» плівок у період припрацювання після виготовлення або відновлення виробу [8].

Основні способи ФАБО, за даними авторів [9, 10], можуть бути здійснені наступними методами:

- фрикційно-механічним – за рахунок тертя металічного інструменту з деталлю у присутності технологічного середовища;

- хімічним – шляхом введення в зону контакту технологічного середовища, що містить іони відповідного металу;

- фрикційно-механічним, що відбувається тертям неметалічного інструменту з деталлю у присутності металовмісного технологічного середовища.

Метод здійснення ФАБО багато в чому залежить від конструктивних та технологічних особливостей деталі, що обробляється, але саме фрикційно-механічний (рис. 1) є найбільш поширеним внаслідок простоти його здійснення.

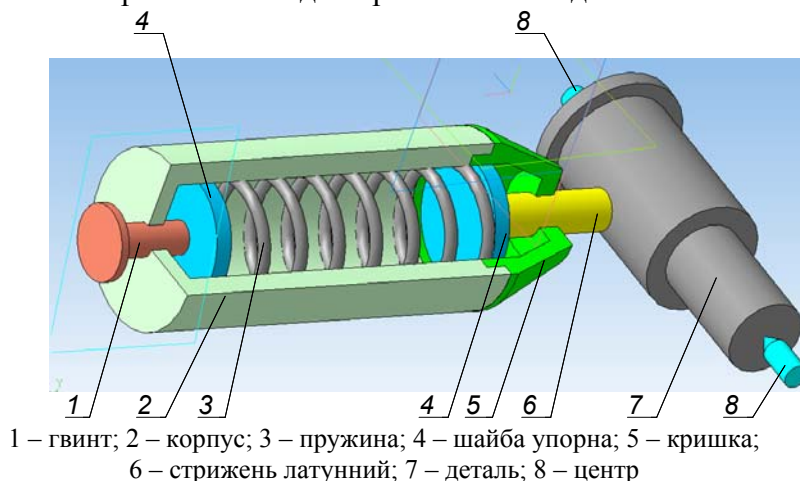
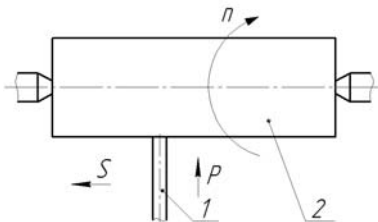
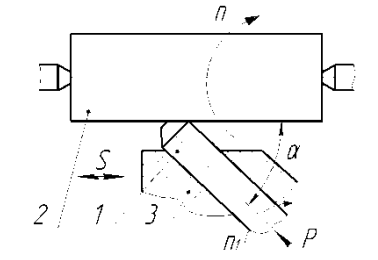
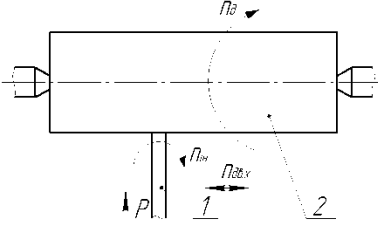
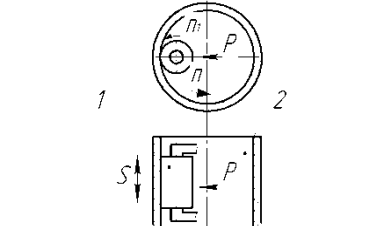
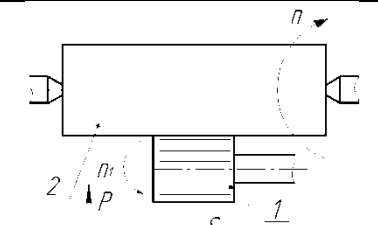
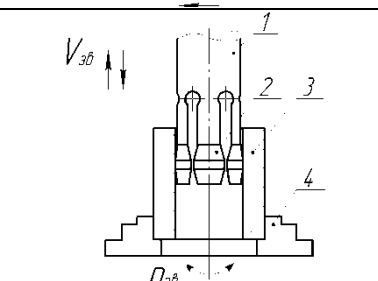


Рисунок 1 – Нанесення антифрикційних покриттів фрикційно-механічним методом
Джерело: розроблено на основі [9]

Аналіз традиційних схем здійснення фрикційно-механічного методу нанесення покриттів (табл. 1) [4], а також пристрої для їх здійснення [10], показав їх ефективність при обробці внутрішньої або зовнішньої поверхонь, що мають форму тіла обертання. Однак, для обробки профільних поверхонь такі схеми є неприйнятними.

Таблиця 1 – Основні схеми реалізації ФАБО

Схема	Особливості схеми, режими обробки
	Антифрикційний інструмент рухається в осьовому напрямку: 1 – інструмент; 2 – деталь, що обробляється; P – зусилля притискання антифрикційного інструменту; n – частота обертання деталі; S – поздовжня подача інструменту
	Антифрикційний інструмент обертається під кутом до осі деталі: 1 – інструмент; 2 – деталь, що обробляється; 3 – обойма; P – зусилля притиснення елемента, що натирає; n – частота обертання деталі; n_l – частота обертання інструменту; S – поздовжня подача інструменту; α – кут нахилу інструменту до деталі
	Антифрикційний інструмент виконує зворотно-поступальний і обертальний рухи: 1 – інструмент; 2 – деталь, що обробляється; P – зусилля притиснення елемента, що натирає; n – частота обертання деталі; n_{in} – частота обертання інструменту; n_{out} – частота обертання інструменту
	Антифрикційний інструмент виконує зворотно-поступальний і обертальний рухи: 1 – інструмент; 2 – деталь, що обробляється; P – зусилля притиснення елемента, що натирає; n – частота обертання деталі; n_l – частота обертання інструменту; S – поздовжня подача інструменту
	Антифрикційний інструмент виконує зворотно-поступальний і обертальний рухи: 1 – інструмент; 2 – деталь, що обробляється; P – зусилля притиснення елемента, що натирає; n – частота обертання деталі; n_l – частота обертання інструменту; S – поздовжня подача інструменту
	Антифрикційний інструмент виконує зворотно-поступальний рух уздовж осі деталі з дискретним її обертанням 1 – кільце розрізне; 2 – бруски антифрикційні; 3 – деталь; 4 – пристрій для закріплення деталі; $n_{зб}$ – дискретне обертання інструменту; $V_{зб}$ – зворотно-поступальний рух інструменту

Джерело: розроблено на основі [4, 10]

Зокрема, одними з таких поверхонь є кулачки розподільного валу автотракторних ДВЗ, які працюють у важких умовах граничного мащення, що супроводжується розриваннями масляної плівки в зоні контакту кулачка з штовхачем, а

отже, піддаються інтенсивному зношуванню. Зниження висоти профілю кулачка приводить до різкого погіршення техніко-економічних показників ДВЗ [11-13]. Доцільність ФАБО кулачків розподільних валів ДВЗ переконливо доведено в роботі [14].

Однією з проблем обробки кулачків є складність їх геометричної форми, що унеможливає використання універсальних технологічних пристосувань. Відомі конструкції пристосувань для ФАБО, як правило, створюють навантаження на інструмент за рахунок використання навантажувальних пристроїв пружинної дії.

Для обробки криволінійних поверхонь, зокрема кулачків розподільних валів, такі пружинні пристосування використовувати неможливо, адже при обертанні розподільного валу та набіганні кулачка на інструмент пружина навантажувального пристрою буде поперемінно стискатися та розтискатися, що приведе до створення змінного навантаження на інструмент (латунний стрижень). Це, у свою чергу, приведе до зміни режимів ФАБО. Відсутність постійного тиску інструмента на деталь, недостатня температура в зоні контакту не дозволяють створити умови для формування якісного покриття на циліндричній та профільній частині кулачка.

Враховуючи те, що існуючі конструкції не забезпечують належну якість ФАБО кулачків розподільних валів ДВЗ, виникає необхідність в обґрунтованому підході щодо вибору схеми і розробки пристрою для нанесення антифрикційних покриттів з урахуванням профілю робочої поверхні.

Постановка завдання. Метою даної роботи є обґрунтування конструкції та розробка пристрою для ФАБО кулачків розподільного валу фрикційно-механічним методом.

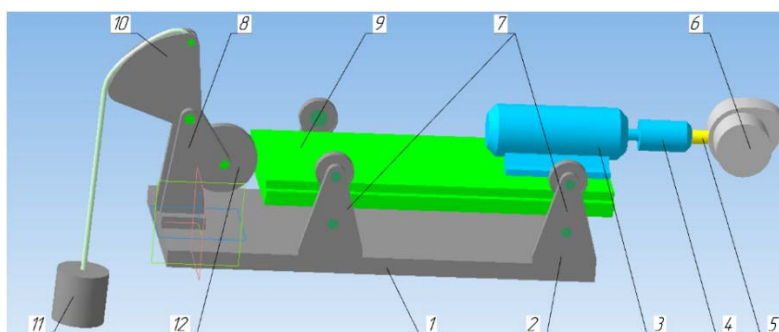
З урахуванням складної геометрії профілю кулачка конструкція пристрою повинна забезпечити:

- необхідну траєкторію руху інструменту або деталі, яка копіює форму кулачка, створюючи умови для якісної реалізації вибіркового перенесення антифрикційного матеріалу при фрикційно-механічному методі ФАБО;
- постійне зусилля при контактуванні інструменту з робочою поверхнею кулачка.

Виклад основного матеріалу. Виходячи із встановлених вимог нами запропоновано ряд конструктивних рішень, що створюють необхідні умови для нанесення антифрикційних покриттів на робочу поверхню кулачка розподільного валу ДВЗ фрикційно-механічним методом.

Одним із рішень поставленої задачі може бути використання важільної схеми навантаження інструменту, яка забезпечує постійне зусилля тиску інструменту на поверхню кулачка з врахуванням його геометрії.

Застосування такого підходу лягло в основу конструкції пристосування (рис. 2), що встановлюється на супорт токарного верстату, а розподільний вал, згідно запропонованої схеми, – в патроні верстату з підтримкою за допомогою центру.



1 – основа; 2 – кронштейн; 3 – електродвигун; 4 – патрон; 5 – інструмент (латунний пруток); 6 – кулачок, що обробляється; 7 – ролики; 8 – опора важеля; 9 – рухома платформа; 10 – важіль; 11 – вантаж; 12 – упорний ролик

Рисунок 2 – Схема пристосування для ФАБО кулачків розподільного валу

Джерело: розроблено авторами

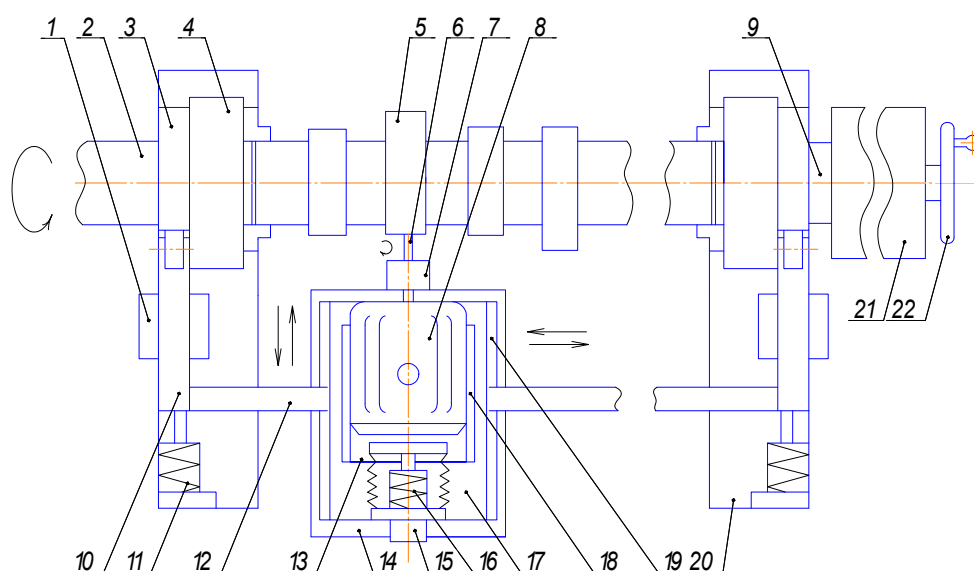
Конструкцію пристосування складає основа 1, на якій закріплені кронштейни 2 з роликами 7. На роликах в горизонтальній площині встановлюється рухома платформа 9, на якій монтується електродвигун 3, на вихідному валу якого кріпиться патрон 4 з закріпленим інструментом (прутком з антифрикційного матеріалу) 5. Торець стрижня упирається в кулачок розподільного валу. В задній частині пристосування на платформі 1 встановлюється двоплечий важіль 10, що хитається на осі на опорі 8. Одне плече важеля має округлений профіль, через який перекинута трос із закріпленням на ньому вантажем 11.

Завдяки округленому профілю забезпечується передача постійного зусилля через важіль 10 на рухому платформу 9. Зусилля передається через упорний ролик 12, який встановлюється на осі іншого плеча важеля 10. Завдяки застосуванню ролика зменшується тертя при ковзанні по рухомій платформі 9.

Пристосування працює наступним чином. Розподільний вал обертається в токарному верстаті, при цьому його кулачок 6 поступово провертається навколо своєї осі. До кулачка притиснений інструмент (пруток), який обертається від електродвигуна 3. Рухома платформа 9 переміщується на роликах. У випадку коли на інструмент набігає на вершину кулачка, платформа відкочується назад, після проходження кулачка і підходу його циліндричної частини платформа виконує переміщення вперед. При цьому інструмент притискається завжди з постійним зусилля, яке забезпечується внаслідок дії вантажу 11 через двоплечий важіль 10, що упирається роликом 12 в тилу частину рухомої платформи 9.

Головною особливістю запропонованої конструкції є наявність важільного навантажувального пристрою, що забезпечує постійне осьове навантаження, а отже, створює постійне зусилля інструменту на поверхню кулачка, що обробляється, фрикційно-механічним методом.

Іншим підходом до завдання розробки пристрою для ФАБО кулачків розподільного валу є конструкція пристосування, що складається з двох вузлів: копіювального і натирального (рис. 3).



1 – напрямна штовхача; 2 – шпindel верстата; 3 – копір; 4 – патрон верстату; 5 – поверхня, що обробляється (кулачок розподільного валу); 6 – інструмент з антифрикційного матеріалу; 7 – патрон закріплення інструменту; 8 – електродвигун; 9 – піноль задньої бабки верстата; 10 – штовхач з роликами; 11 – пристрій притискання штовхача до копіра; 12 – штанга; 13 – стіл; 14 – основа; 15 – пробка нарізна регульовальна; 16 – пристрій притискання інструменту до поверхні, що обробляється (кулачка розподільного валу); 17 – платформа; 18 – напрямна столу; 19 – напрямна платформи; 20 – кронштейн; 21 – задня бабка верстата; 22 – рукоятка пінолі

Рисунок 3 – Пристрій для ФАБО кулачків розподільного валу

Джерело: розроблено авторами

Копіювальний вузол, що призначений для відтворення геометрії профілю кулачка, складається з двох ідентичних частин, кожна з яких містить: копір 3, кронштейн 20, штовхач із роликом 10, напрямну штовхача 1, притискний пристрій 11. Два штовхачі з'єднані між собою штангою 12.

До складу натирального вузла входять: основа 14, поперечні напрямні 19, якими пересувається платформа 17, стіл 13, на якому встановлений електродвигун 8, на вихідному валу якого кріпиться патрон 7 з латунним інструментом 6. Для поперечного руху столу 13 щодо платформи передбачено напрямні 18. Для створення необхідного зусилля інструмента 6 до деталі 5 на столі змонтовано притискний пристрій 16 з нарізною пробкою 15.

Принцип роботи запропонованої конструкції полягає у наступному. Розподільний вал встановлюється в патронах передньої і задньої бабки токарно-гвинторізного верстата таким чином, щоб вершини копирів і кулачка, що обробляється, збігалися. Далі, переміщенням супорта за допомогою холостого ходу поздовжньої подачі виставляється латунний інструмент у робоче положення – навпроти кулачка.

Притиснення інструменту до робочої поверхні кулачка забезпечується обертанням за годинниковою стрілкою нарізною пробкою притискного пристрою.

При обертанні шпинделя верстата зусилля від копирів 3 через штовхачі зі штангою 11 передається платформі 15 стисненням пружини притискного пристрою 12. Повернення платформи у вихідне положення відбувається під дією стиснутих пружин притискного пристрою.

Таким чином, рухома платформа разом зі столом та інструментом здійснює поперечний зворотно-поступальний рух відносно основи і супорта, копіюючи при цьому профіль кулачка розподільного валу, що обробляється.

При ввімкненні поздовжньої подачі супорта верстата платформа, яка переміщується по штанзі, здійснює поступальний рух паралельно до осі обертання розподільного валу. Латунний інструмент, у свою чергу, який обертається від електродвигуна, притискається з необхідним зусиллям до робочої поверхні кулачка розподільного валу.

Накладення рухів деталі (обертального) та інструменту (обертального і зворотно-поступального), а також стабільний контакт поверхні деталі, що обробляється, та інструменту забезпечують необхідні умови для нанесення покриттів фрикційно-механічним способом.

Відмінною особливістю запропонованої конструкції є наявність копирів, що дають змогу інструменту, який здійснює зворотно-поступальний і обертальний рухи, відстежувати профіль кулачка. Подібне конструкторське рішення також забезпечує стабільне зусилля інструменту до робочої поверхні кулачка за всієї геометрії його профілю.

Слід також зазначити, що запропонована конструкція пристосування для нанесення покриттів дає змогу шляхом додаткового встановлення осцилятора здійснювати осцилюючий рух.

Обґрунтований підхід до розробки конструкції запропонованих пристроїв дозволяє стверджувати про можливість забезпечення необхідних умов для нанесення антифрикційних покриттів на робочу поверхню кулачка розподільного валу. Виконання експериментальних досліджень, що вимагають виготовлення пристрою та проведення випробувань у лабораторних або виробничих умовах, дозволять обрати з двох варіантів конструкцій найбільш ефективний.

Висновки. Важливим результатом виконаної роботи слід вважати обґрунтування конструкції пристроїв для нанесення антифрикційних покриттів на робочу поверхню кулачка з врахуванням геометрії його профілю. Головними відмінними особливостями запропонованих конструкторських рішень є:

- застосування важливої схеми навантаження інструменту, яка забезпечує постійне його навантаження з необхідним зусиллям.

- наявність копіїв, що дозволяє інструменту здійснювати зворотно-поступальний і обертальний рухи за траєкторією, що відповідає формі кулачка, із забезпеченням необхідного стабільного зусилля за всієї геометрії його профілю.

Список літератури

1. Фролов Є.А., Кравченко С.І., Попов С.В., Гнітько С.М. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: Монографія. Полтава, 2019. 201 с.
2. Солових Є.К. Тенденції розвитку технологій поверхневого зміцнення у машинобудуванні: Монографія. – Кіровоград: КОД. 2012. – 92 с.
3. Shepelenko I.V. Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*, Хмельницький, 2021. Т.26, №2/100. С.50–57. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57>
4. Черновол М.І., Шепеленко І.В. Пристрої для фрикційно-механічного нанесення покриттів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. 2013. Вип.26. С. 58 – 62. <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/4cda4d8c-a34b-41c3-98c1-e4c54a5d5c3d/content>
5. Черновол М.І., Шепеленко І.В., Василенко І.Ф. та ін. Теоретичні основи та технологічні процеси відновлення деталей машин: Навчальний посібник. Харків: «Діса плюс», 2025. 347 с. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/63944>
6. Пат. 35859А Україна, С23С20/00. Спосіб нанесення антифрикційних покриттів / М. І. Черновол, В. В. Черкун, В. М. Наливайко та ін. №99010210; заявл. 14.01.99; опубл. 16.04.01, Бюл.№3.
7. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Stepchyn, Y., Mahopets, S., Melnyk, O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskiy, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 209-218. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19
8. Investigation of Non-abrasive Antifrictional Surface Finishing K. Tiškevičius, J. Padgurskas, I. Prosyčevs Faculty of Engineering, Lithuanian University of Agriculture, Kaunas, Lithuania Institute of Physical Electronics, Kaunas University of Technology ISSN 1392–1320 MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA). Vol. 9, No. 1. 2003.
9. М.М. Косіюк, С.А. Костюк, М.А. Костюк. Технологічне забезпечення нанесення антифрикційного покриття на неповні сферичні поверхні фрикційно-механічним способом. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2018. №4. С. 39–43.
10. Шепеленко І.В. Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування: Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.02.08 / НТУУ „КПІ ім. І. Сікорського”. – К., 2021. – 43 с.
11. Кисликов В.Ф., Лушчик В.В. Будова й експлуатація автомобілів. К.: Либідь, 2006. 400 с.
12. Сирота В.І. Основи конструкції автомобілів. К.: Аристей, 2005. 280 с.
13. Шипунов М. В. Оптимізація роботи газорозподільного механізму двигуна внутрішнього згоряння. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка*. 2013. Вип. 1(2). С. 166–175. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2013_1%282%29_21
14. Шепеленко І.В., Красота А.М., Красота М.В. Зміна напружено-деформованого стану робочої поверхні деталі з антифрикційним покриттям. *Збірник наукових праць. Науковий вісник. Технічні науки*. №11 (42)_І. Кропивницький, 2025. С.179–189. [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/11\(42\)_I/22.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/11(42)_I/22.pdf)

References

1. Frolov, Ye.A., Kravchenko, S.I., Popov, S.V., Hnitko, S.M. (2019). Tekhnologichne zabezpechennia yakosti produktii mashynobuduvannia [Technological support for the quality of engineering products]. Poltava, 201 s [in Ukrainian].
2. Solovih Ye.K. (2012). Tendenciya rozvitku tehnologij poverhnevo zmicnennya u mashynobuduvanni.. [Trends in the development of surface hardening technologies in mechanical engineering]. Kirovohrad, 92 s [in Ukrainian].
3. Shepelenko I.V. (2021). Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Problems of Tribology*, 26(2)/100. 50–57 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57> [in English].
4. Chernovol M.I., Shepelenko I.V. (2013). Pystroiy dlya frikciynno-mehanichnogo nanessenya pokryttiv [Devices for friction-mechanical coating]. *Zbirnik naukovih prac Kirovogradskogo nacionalnogo tehnicnogo universitetu*, 26. 58–62 <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/4cda4d8c-a34b-41c3-98c1-e4c54a5d5c3d/content> [in Ukrainian].
5. Chernovol M.I., Shepelenko I.V., Vasilenko I.F. ta in. (2025). Teoretichni osnovi ta tehnologichni procesi vidnovlennya detalej mashin [Theoretical foundations and technological processes for the restoration of machine parts]. Harkiv, 347 s. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/63944> [in Ukrainian].

6. Pat. №. 35859A Ukraina, C23C20/00. Sposib nanesennya antifrikciynih pokryttiv / Chernovol M.I., Cherkun V.V., Nalivajko V.M. ta in. №99010210; zaiavl. 14.01.99; opubl. 16.04.01, Biul. №3 [in Ukrainian].
7. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Stepchyn, Y., Mahopets, S., Melnyk, O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 209-218. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19 [in English].
8. Investigation of Non-abrasive Antifrictional Surface Finishing K. Tiškevičius, J. Padgurskas, I. Prosyčevs Faculty of Engineering, Lithuanian University of Agriculture, Kaunas, Lithuania Institute of Physical Electronics, Kaunas University of Technology ISSN 1392-1320 *MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA)*. Vol. 9, No. 1. 2003 [in English].
9. Kosiiuk M.M., Kostiuik S.A., & Kostiuik M.A. (2018) Tekhnologichne zabezpechennia nanesennia antyfraktsiynoho pokryttia na nepovni sferychni poverkhni fryktsiino-mekhanichnym sposobom [Technological support for the application of antifriction coating on incomplete spherical surfaces by friction-mechanical method]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. No. 4. 39–43 [in Ukrainian].
10. Shepelenko I.V. (2021). Naukovi osnovi tehnologiyi nanesennya antifrikciynih pokryttiv z vikoristannyam plastichnogo deformuvannya [Scientific basis of the technology of applying antifriction coatings using plastic deformation]. *Avtoreferat disertaciyi doktora tehnicnih nauk*, 43 s [in Ukrainian].
11. Kislikov, V.F., Lushchik, V.V. (2006). Budova y ekspluatatsiia avtomobiliv [Structure and operation of cars]. Kyiv: Lybid, 400 s [in Ukrainian].
12. Syrota, V.I. (2005). Osnovy konstruktsii avtomobiliv [Fundamentals of car design]. Kyiv: Arystei, 280 s [in Ukrainian].
13. Shypunov, M. V. (2013). Optyimizatsiia roboty hazorozpodilnoho mekhanizmu dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia [Optimising the operation of the gas distribution mechanism of an internal combustion engine]. *Zbirnyk naukovykh prats Poltavskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu imeni Yu. Kondratiuka*. Seriia: *Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*. Vyp. 1(2). 166–175 http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2013_1%282%29_21 [in Ukrainian].
14. Shepelenko I.V., Krasota A.M., Krasota M.V. (2025). Zmina napruzhenno-deformovanogo stanu robochoyi poverhni detali z antifrikciynim pokryttiam [Changing the stress-strain state of the working surface of a part with an antifriction coating]. *Zbirnyk naukovykh prac. Naukovy visnik. Tehnicni nauki*. №11 (42)_I. 179–189. [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/11\(42\)_I/22.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/11(42)_I/22.pdf) [in Ukrainian].

Ihor Shepelenko, Prof., DSc, **Artem Krasota**, **Vasiliy Gutsul**, Assoc. Prof., PhD tech. sci,
Mykhailo Krasota, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Substantiation of the Design of a Device for Machining Camshaft Cams by the Friction-Mechanical Method

An analysis of traditional friction-mechanical antifriction coating application schemes, as well as devices for their implementation, have shown their effectiveness in treating surfaces of parts with the shape of a body of revolution. However, for machining complex profile surfaces, which include camshaft cams, the use of such schemes is unacceptable due to the lack of stable contact between the tool and the part. The aim of the presented work is to substantiate the design and develop a device for finishing antifriction non-abrasive machining of camshaft cams by friction-mechanical method.

The ways to achieve the goal are determined - to provide the necessary trajectory of movement of the tool or part, which copies the shape of the cam and creates the necessary conditions for the qualitative implementation of the selective transfer of antifriction material to the working surface of the part. This can be achieved through the use of a lever-type tool loading scheme that ensures a constant tool pressure force on the cam surface, taking into account its geometry. The proposed approach made it possible to develop the design of a device for applying antifriction coatings with a finishing antifriction non-abrasive treatment to the working surface of camshaft cams. Another approach to solving this problem is to use the design of a device containing copying and rubbing units.

The presence of copiers in the proposed device ensures the creation of reciprocating and rotational movement of the tool along a trajectory corresponding to the shape of the cam with the required stable force. The justification of the device designs allows us to assert the possibility of providing high-quality conditions for the finishing antifriction non-abrasive machining of camshaft cams. Experimental studies that require the manufacture of the device and testing in laboratory or production conditions will allow you to choose the most effective design from the two options.

camshaft, automotive tractor engine, antifriction coating, wear resistance, friction-mechanical method, lever loading scheme of the tool, copying device

Одержано (Received) 08.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 16.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.3.026.4:622.012.2

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.177-183](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.177-183)

А. В. Рухлов, доц., канд. техн. наук, Н. Ю. Рухлова, доц., канд. техн. наук, М. М. Воронін
ТОВ "Технічний університет "Метінвест Політехніка", м. Запоріжжя, Україна
e-mail: artem.rukhlov@mipolytech.education

Складники добового профілю електроспоживання вугільної шахти

Техніко-економічні умови енергозабезпечення стимулюють підприємства реалізовувати заходи щодо регулювання режимів електроспоживання. Такі заходи можуть значно змінити розрахунковий (фактичний) максимум електричного навантаження вугільної шахти, визначення нової величини якого за допомогою відомих методів не дозволить отримати коректний результат через неврахування останніми сучасних тенденцій щодо регулювання електроспоживання. Тому пропонується визначати максимальні електричні навантаження на підставі модельованих групових профілів електроспоживання.

добовий профіль електроспоживання, дисперсія, графік електричного навантаження, регулювання електроспоживання, вугільна шахта

Постановка проблеми. Одним із основних викликів для Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України є проблема забезпечення пікових електричних навантажень, яка останнім часом тільки ускладнилася через військові дії та масовані атаки ворога на енергетичну інфраструктуру нашої країни. Безпосередньо добові графіки виробництва та споживання електричної енергії в ОЕС України для різних періодів року характеризуються значною нерівномірністю, що викликана в основному за рахунок приросту побутового та комунального електроспоживання.

Визначальний вплив на форму графіка електричного навантаження (ГЕН) енергосистеми має населення та комунально-побутові споживачі, частка електроспоживання яких з урахуванням спаду промислового виробництва (особливо металургії) в сукупному енергобалансі перевищує 50 %. Слід зазначити, що регульовальний потенціал вказаних споживачів частково забезпечується наявністю зонних тарифів зі зниженою ставкою протягом нічного провалу навантаження енергосистеми. Проте, потужні промислові підприємства, що працюють цілодобово, також мають резерви щодо регулювання власного електроспоживання за умови зміни режиму роботи та наявності технологічних процесів, які можуть бути зміщені у часі з урахуванням добової динаміки зміни вартості електричної енергії на оптовому ринку [1]. Отже, сучасні принципи електрозабезпечення енергоємних промислових підприємств ґрунтуються на необхідності вирівнювання добового ГЕН енергосистеми, що пов'язано із дефіцитом пікових потужностей, високими питомими витратами палива на теплових електростанціях через необхідність використання їх для роботи в маневреному режимі, поганим технічним станом устаткування, низькою якістю палива та іншими причинами. Варто зазначити, що негативна характеристика нашої енергосистеми з точки зору регулювання добового профілю електроспоживання мала місце й до військової агресії, а зараз тільки посилилася. Тому диференційована за зонами доби вартість електроенергії на оптовому ринку має стимулювати потужні підприємства до регулювання режиму електроспоживання, яке зводиться до перенесення часу роботи певних споживачів-регуляторів (СР) із зон максимальних навантажень в енергосистемі в інші зони без шкоди технологічному процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вимоги часу призводять до необхідності підвищення енергетичної безпеки вуглевидобувних підприємств: електроенергії завжди має бути стільки та такої якості, скільки потрібно для забезпечення стабільного функціонування шахти. Централізоване електропостачання, на превеликий жаль, не дає повної впевненості у цьому питанні, що і є одним з основних його недоліків. До інших слід віднести низьку ефективність: вугілля видобувають на шахті й транспортують до теплових електростанцій, де спалюють із низьким коефіцієнтом корисної дії ($\approx 30\text{--}33\%$), що забезпечує викиди значного обсягу шкідливих речовин, а вироблену електроенергію знову повертають підприємству, але вже з істотними втратами в елементах системи електропостачання. Більш енергетично та економічно ефективний варіант – децентралізоване енергопостачання шахти або групи шахт від власного джерела енергії з високим коефіцієнтом корисної дії та маневреністю, тим паче, що для його сталої роботи є власне паливо – вугілля та/або метан. Таке джерело забезпечить прилеглі підприємства теплом та електроенергією, собівартість вироблення якої буде нижчою, ніж вартість у енергосистеми, та, найголовніше, підвищить енергетичну безпеку за рахунок можливості функціонування шахти навіть у разі повного припинення централізованого енергопостачання [2, 3]. Окрім цього, не варто відкидати варіант енергозабезпечення вуглевидобувного підприємства від «популярних» сьогодні сонячних та вітрових електростанцій.

Аналізу режимів електроспоживання та їх ефективності загалом для вугільних шахт та її окремих технологічних процесів присвячені певні цикли наукових робіт. Так, у роботі [4] розглядається математична модель для визначення комплексної енергоефективності вугільних шахт та ранжування їх за цим показником. Автори роботи [5] розробляють багатофакторне прогнозування електроспоживання вугільної шахти за допомогою нейронної мережі в розрізі річного інтервалу часу. Роботи [6, 7] присвячені обґрунтуванню та розробці багаторівневої інтелектуальної системи керування електроспоживанням стаціонарних установок гірничо-збагачувальних комбінатів та рудних шахт. Аналізу та підвищенню енергоефективності окремих технологічних процесів вугільних шахт присвячені роботи [8–10]. Однак автори наведених робіт не розглядають вуглевидобувне підприємство як потенційний споживач-регулятор залежно від джерела енергії (або їхньої комбінації) та можливості відповідного коригування режимів електроспоживання основних технологічних процесів.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз режимів електроспоживання вугільних шахт та визначення їхніх показників в контексті реалізації різних способів енергозабезпечення.

Виклад основного матеріалу. Аналіз значень річної кількості годин використання максимуму активної потужності T_m для вугільних шахт з урахуванням максимально можливого й економічно виправданого залучення електроприймачів як СР, що дають змогу здійснювати «глибоке» регулювання електроспоживання, свідчить, що за таких умов T_m може зменшуватися до 3000–3500 год за нормального значення для вугільних шахт на рівні 4500–5500 год. При цьому підприємство, здійснюючи регулювання, знижує величину T_m для власного профілю електроспоживання, а для ГЕН енергосистеми – підвищує.

Для умов актуального сьогодні децентралізованого енергопостачання (за рахунок власних джерел розподіленої генерації) та раціонального використання генерованої потужності для підприємства виникає аналогічна ситуація, як і для енергосистеми у разі централізованого електропостачання, за якого необхідно забезпечити найбільш рівномірний профіль електроспоживання, чого практично можливо досягти при $T_m = 6000\text{--}7000$ год. Таким чином, вугільна шахта, електропостачання якого може здійснюватися як централізовано, так і децентралізовано, з метою ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів повинна мати можливість організовувати

режими електроспоживання для діапазону значень $T_m = 3000-7000$ год. При цьому максимум активної потужності споживача може змінюватися до 2 разів [1].

Отже, промислові підприємства мають запроваджувати заходи з регулювання режимів електроспоживання, використовуючи з цією метою споживачі-регулятори, які здатні до обмеження або перенесення частини свого електричного навантаження з одних годин доби на інші (при добовому регулюванні) або з робочих днів на вихідні (при тижневому регулюванні). Причому зміна режиму роботи СР має відбуватися без завдання шкоди нормальному протіканню технологічного процесу, у якому вони задіяні.

Припустимо, що максимальна споживана вугільною шахтою електрична потужність до регулювання режиму електроспоживання P_m близька за величиною із навантаженням, розрахованим на стадії проектування, та визначає вибір елементів системи електропостачання (силових трансформаторів, магістральних повітряних і кабельних ліній, комутаційної апаратури тощо), за якими визначаються капітальні витрати. Диференційована за зонами доби вартість електроенергії на оптовому ринку є економічним стимулом для регулювання режиму електроспоживання шахтою, коли у результаті виконання зазначених заходів величина P_m може змінитися або залишитися приблизно на тому самому рівні. Позначимо максимальне навантаження вугільної шахти при регулюванні режиму електроспоживання як P'_m .

Припустимо, що в результаті перенесення часу роботи СР із пікових зон у зони з дешевшою електроенергією відбувається певне вирівнювання добового профіля електроспоживання шахти та, відповідно, зниження максимальної споживаної потужності ($P'_m < P_m$). На стадії експлуатації це призводить не тільки до зниження оплати за електроенергію, а й до зменшення навантаження на елементи системи електропостачання та появи їх надлишкової пропускної спроможності, а на стадії проектування – до можливості вибору таких елементів меншого типорозміру і, тим самим, зниження капітальних витрат.

Можливий зворотній випадок, коли за рахунок регулювання режимів електроспоживання відбувається зростання максимальної споживаної потужності ($P'_m > P_m$). На стадії експлуатації це призводить до зниження оплати за електроенергію шахтою з одночасним збільшенням навантаження на елементи системи електропостачання та їх потенційним перевантаженням, а на стадії проектування – до необхідності вибору таких елементів більшого типорозміру і, тим самим, підвищення капітальних витрат.

Добовий профіль електроспоживання шахти у випадку, коли максимальне навантаження до і після регулювання режиму електроспоживання залишається незмінним ($P'_m = P_m$) представляє найменший практичний і теоретичний інтерес. Вартість електроенергії зменшується за рахунок зниження її споживання у пікових зонах.

Виконаний аналіз підтверджує важливість точного визначення максимальних електричних навантажень як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації підприємства у сучасних ринкових умовах, коли споживачі економічно зацікавлені у регулюванні режимів електроспоживання та вирівнюванні ГЕН енергосистеми. На жаль, наявні методи розрахунку електричних навантажень не враховують зазначених тенденцій через те, що використовувані методи (статистичний модифікований, коефіцієнта попиту, максимуму, питомої витрати електроенергії тощо) розроблені для умов «нормального» протікання технологічного процесу і, відповідно, режиму електроспоживання, а завдання визначення електричних навантажень зведене до розрахунку величини півгодинного максимуму, що матиме місце хоча б один раз на зміну. Окрім цього, зазначені методи не дають змоги визначити періоди споживання максимального навантаження, інформація щодо яких дасть можливість уникнути його збільшення під час зміни часу роботи СР.

Зазначених недоліків можна уникнути, якщо максимальні електричні навантаження шахти визначати за модельованими добовими профілями

електроспоживання, що відповідають новим режимам технологічних процесів. Формування таких профілів здійснюється шляхом перебору можливих варіантів індивідуальних ГЕН для електроприймачів з урахуванням їхніх технологічних обмежень та необхідності реалізації заходів щодо регулювання режимів електроспоживання. У такому разі потрібно використовувати потужний апарат моделювання індивідуальних і групових ГЕН для їхнього формування, аналізу та подальшого представлення.

Інший варіант полягає у всебічному аналізі технологічних процесів вугільної шахти та визначенні не тільки самих СР, а й їх навантаження при регулюванні режимів електроспоживання окремо для кожної із зон доби. Тут передбачається, що її зміна в часі буде відома і врахована наявними розрахунковими методами, а сумарна споживана протягом доби потужність електроприймачів, які не беруть участі в регулюванні, майже не змінюється, оскільки вони працюють у незмінному режимі. Наприклад, для вугільної шахти необхідно передбачити збільшення максимального навантаження в години напівпіку та нічного провалу за рахунок увімкнення додаткової кількості насосів головного водовідливу, максимального завантаження конвеєрного транспорту та вугільного підйому для транспортування накопиченого вугілля у акумулюючих бункерах (за їх наявності) тощо.

Виконані дослідження свідчать, що у загальному випадку ГЕН окремих електроприймачів вугільних шахт можна представити трьома основними кластерами, що формують груповий профіль електроспоживання (рис. 1). Групування графіків на три кластери виконано на основі інструментальних спостережень та аналізу їх результатів. За основні ознаки подібності ГЕН одного кластера прийнято топологію графіка та дисперсію (або стандарт) навантаження. Додатковою ознакою подібності є технологічний режим (регламент) роботи електроприймача з урахуванням наявності або відсутності технічних та інших пристроїв для регулювання режимів електроспоживання.

Як відомо, дисперсія ГЕН визначається різницею $DP = P_{ск}^2 - P_c^2$, де $P_{ск}$ та P_c – відповідно середньоквадратична та середня активна споживана потужність. Стандарт (середньоквадратичне відхилення) навантаження визначається як $\sigma P = \sqrt{DP}$. При осередненні добового ГЕН на $N = 48$ півгодинних інтервалів $P_{ск}$ і P_c дорівнюють:

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N P_i^2}{N}}, \quad P_c = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N},$$

де P_i – осереднена за i -й півгодинний інтервал споживана потужність, кВт.

На рис. 1, а для першої групи електроприймачів наведено лінійну рівномірну (одноступеневу) модель графіка навантаження, для другої групи (рис. 1, б) – ступеневу модель, для третьої групи електроприймачів (рис. 1, в) – модель, для якої індивідуальні графіки потужності електроприймачів нерівноперіодичні. Ступенева модель може бути представлена дво- і тріступеневою. Слід зазначити, що для моделей (рис. 1, б і в) розглянуто дисперсії навантаження одного ступеня, тобто ті, що відносяться до часу одного циклу ввімкнення.

Зазначені моделі графіків навантаження мають відповідні дисперсії, що ускладнює їх моделювання та формування групових профілів електроспоживання шахти. Для визначення еталонних ГЕН розглянутих трьох моделей виконано фільтрацію відповідно до наступної процедури. Максимум півгодинного середнього навантаження:

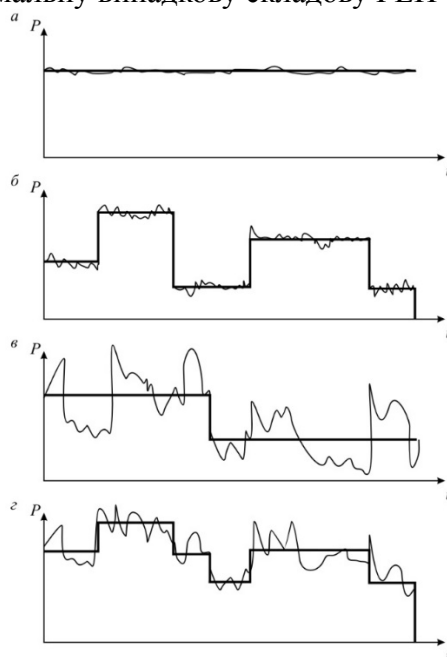
$$P_m = P_c + \alpha_c \sqrt{DP_{30}}, \quad (1)$$

де DP_{30} – дисперсія середніх півгодинних навантажень за час увімкнення; α_c – статистичний коефіцієнт, що враховує ймовірність перевищення поточним навантаженням $P(t)$ рівня P_m , який за нормального закону розподілу $\alpha_c = 1,6-1,7$.

Враховуючи припущення для досліджуваних навантажень, що максимальна та мінімальна величина $P(t)$ є рівновіддаленими від середнього значення P_c за час увімкнення, з (1) отримаємо «відфільтровану» постійну складову графіка навантаження

$$P(t)_{\text{пос}} = P_c - \alpha_c \sigma P$$

та «відфільтровану» випадкову складову ГЕН $P(t)_{\text{вип}} = 2\alpha_c \sigma P$.



a – перша група, *б* – друга, *в* – третя група, *г* – груповий профіль

Рисунок 1 – Моделі індивідуальних ГЕН електроприймачів вугільної шахти

Джерело: розроблено авторами

Аналіз отриманих результатів розрахунків показників індивідуальних ГЕН для шахт з пологим та похилим заляганням пластів дозволяє встановити, що його постійна складова у груповому профілі електроспоживання шахти переважає та становить 70-75 %, а випадкова значно менша – 25-30 % (див. табл. 1). Це дозволить нам коректно обирати потужність та режими роботи джерел енергії за комбінованого способу енергозабезпечення.

Крім того, індивідуальні ГЕН характеризуються розрахунковими коефіцієнтами форми ($K_\phi = P_{ск} / P_c$) і заповнення графіка ($K_{зг} = P_c / P_m$). Аналізуючи дані табл. 1 зазначимо, що ГЕН електроприймачів I групи мають мінімальне значення K_ϕ і максимальне $K_{зг}$, що ще раз підтверджує рівномірний характер навантаження цих електроустановок [8]. Навпаки, електроприймачі III групи характеризуються випадковим режимом роботи, тому й коефіцієнт форми для їхніх графіків максимальний, а заповнення графіка – мінімальний.

Таблиця 1 – Показники профілів електроспоживання груп електроприймачів вугільних шахт

Група електроприймачів	Середня потужність від загальношахтної, %	Стандарт навантаження, %	Потужність від загальношахтної після фільтрації, %		Середнє значення коефіцієнтів для груп ЕП	
			постійна складова	випадкова складова	K_ϕ	$K_{зг}$
I - вентилятор головного провітрювання; - підземне освітлення;	20,5	4,1	19,10	1,4	1,04	0,9
	1,5	2,5	1,44	0,06		

Продовження таблиці 1

II						
- вугільний та породний підйоми;	18,0	10,0	15,03	2,97		
- головний водовідлив;	19,5	9,0	16,61	2,89	1,18	0,55
- компресорна станція;	1,5	5,0	1,38	0,12		
- конвеєрний транспорт;	11,0	15,0	8,28	2,72		
- освітлення поверхні;	0,5	22,0	0,32	0,18		
III						
- вантажо-людський підйом;	6,0	36,6	2,38	3,62		
- очисні та підготовчі вибої;	13,5	33,8	5,97	7,53	1,3	0,38
- котельня;	3,2	50,0	0,60	2,60		
- склади та допоміжні цехи;	3,8	60,0	0,03	3,77		
- АПК.	1,0	60,0	0,02	0,98		
Усього	100	-	71,15	28,85		

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Вимоги сьогодення все більше схиляють чашу терезів у бік децентралізованого (або комбінованого) енергозабезпечення промислових підприємств, у тому числі вугільних шахт. У цьому випадку підвищується доцільність та ефективність заходів щодо регулювання режимів електроспоживання, реалізація яких може викликати суттєву зміну величини максимальних електричних навантажень підприємства. Існуючі методи їхнього розрахунку не адаптовані до сучасних умов експлуатації, за яких економічно вигідно знижувати рівень електроспоживання в години максимальних навантажень в енергосистемі та підвищувати в години мінімальних. Можливі шляхи розв'язання цієї проблеми – визначення електричних навантажень за модельованими ГЕН, що відповідають новому режиму електроспоживання, або для кожної зони доби з урахуванням перенесення часу функціонування споживачів-регуляторів. Для таких умов технологічно-математичне моделювання групових профілів електроспоживання шахти виконується на основі результатів класифікації режимів роботи окремих електроприймачів з метою регулювання режимів електроспоживання стосовно відповідного (децентралізованого або комбінованого) режиму електропостачання. При цьому як еталонні ГЕН для відповідних груп електроприймачів варто приймати рівномірний, ступеневий і випадковий.

Список літератури

1. Рухлов А.В., Луценко І.М., Рухлова Н.Ю., Кошеленко Є.В., Замкова О.А. Регулювання електроспоживання підприємств для зниження пікових навантажень в енергосистемі. *Збірник наукових праць НГУ*, 2023. № 74. С. 204-212. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.204>
2. Сергієнко Л.В., Сергієнко О.І. Обґрунтування способу автономного енергозабезпечення вугільного підприємства. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика»*, 2024. №1 (30). С. 85-90. URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2024-1-85-90.pdf>
3. Сергієнко Л.В., Сергієнко О.І. Обґрунтування комплексного проекту виробництва теплової та електричної енергії з використанням метану закритих шахт. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика»*, 2024. №2 (31). С. 63-67. URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2024-2-63-67.pdf>
4. Волинець В.І., Коменда Н.В., Романюк М.В., Бандура І.О., Гайдай А.В. Ранжування електротехнічних комплексів вугільних шахт за енергоефективністю. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика»*, 2023. №2 (29). С. 17-21. URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2023-2-17-21.pdf>
5. Добровольська Л.Н., Волинець В.І., Бандура І.О. Багатофакторне прогнозування споживання електротехнічних комплексів вугільних шахт для планування їхніх енергоефективних режимів. *Наукові праці ВНТУ*, 2015. № 2. 1-9.
6. Хорольський В.П., Шпанько М.І. Інтелектуальна система управління електроспоживанням стаціонарних установок шахт. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2015. № 4. 173-179.
7. Хорольський В.П., Хорольський Д.В., Тігоренко К.Г. Багаторівнева інтелектуальна система оптимізації електроспоживання гірничо-збагачувальних підприємств. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2015. № 2. 192-198.

8. Рухлов А.В., Рухлова Н.Ю., Кириченко М.С. Профїлі електроспоживання головних вентиляторів вугільних шахт. *Збїрник наукових праць НГУ*, 2024. № 77. С. 111-117. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.111>
9. Papaika Yu.A., Lysenko O.G., Rodna K.S., Shevtsova O.S. Information technologies in modeling operation modes of mining dewatering plant based on economic and mathematical analysis. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020. № 4, 82-87. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/082>.
10. Razumnyi Yu.T., Rukhlova N.Yu., Rukhlov A.V. Energy efficient work of a coal mine dewatering plant. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2015. № 2. 74-79. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/1044-2015/zmist-2-2015/>

References

1. Rukhlov, A.V., Lutsenko, I.M., Rukhlova, N.Iu., Koshelenko, Ye.V., Zamkova, O.A. (2023). Power consumption regulation of enterprises to reduce peak loads in the power system. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*. 74, 204-212 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.204>
2. Serhiienko, L.V., Serhiienko, O.I. (2024). Justification of the autonomous power supply method of a coal enterprise. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriiia «Elektrotekhnika i enerhetyka»*. 1 (30), 85-90 [in Ukrainian]. URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2024-1-85-90.pdf>
3. Serhiienko, L.V., Serhiienko, O.I. (2024). Justification of an integrated project for the production of heat and electricity using methane from abandoned mines. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriiia «Elektrotekhnika i enerhetyka»*. 2 (31), 63-67 [in Ukrainian]. URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2024-2-63-67.pdf>
4. Volynets, V.I., Komenda, N.V., Romaniuk, M.V., Bandura, I.O., Haidai, A.V. (2023). Ranking of electrical complexes of coal mines by energy efficiency. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriiia «Elektrotekhnika i enerhetyka»*. 2 (29), 17-21 [in Ukrainian]. URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2023-2-17-21.pdf>
5. Dobrovolska, L.N., Volynets, V.I., Bandura, I.O. (2015). Multifactorial forecasting of consumption of electrical complexes of coal mines for planning their energy-efficient modes. *Naukovi pratsi VNTU*. 2, 1-9 [in Ukrainian].
6. Khorolskyi, V.P., Shpanko, M.I. (2015). Intelligent power consumption management system for stationary installations in mines. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 4, 173-179 [in Ukrainian].
7. Khorolskyi, V.P., Khorolskyi, D.V., Titorenko, K.H. (2015). Multilevel intelligent system for optimizing power consumption at mining and processing enterprises. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 2, 192-198 [in Ukrainian].
8. Rukhlov, A.V., Rukhlova, N.Yu., Kyrychenko, M.S. (2024). Power consumption profiles of main fans at the coal mines. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*. 77, 111-117 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.111>
9. Papaika, Yu.A., Lysenko, O.G., Rodna, K.S., Shevtsova, O.S. (2020). Information technologies in modeling operation modes of mining dewatering plant based on economic and mathematical analysis. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 4, 82-87. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/082>.
10. Razumnyi, Yu.T., Rukhlova, N.Yu., Rukhlov, A.V. (2015). Energy efficient work of a coal mine dewatering plant. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2, 74-79. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/1044-2015/zmist-2-2015/>

Artem Rukhlov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Nataliia Rukhlova, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Mykhailo Voronin Components of the Daily Power Consumption Profile of a Coal Mine

The article is dedicated to analysis of the power consumption modes of coal mines and determination of their indicators in the context of implementing various methods of energy supply.

The authors of the article analyze the advantages and disadvantages of centralized and decentralized (combined) methods of enterprise energy supply, and given the current trends in the Ukrainian energy system, this analysis allows us to state that the second option is increasingly more expedient. However, the economic and technological conditions of any method of energy supply encourage enterprises to implement certain measures to regulate the power consumption modes which consist in shifting the operating hours of powerful regulatory consumers throughout the day without causing damage to the technological process. The authors emphasize that such measures can significantly change the estimated (actual) maximum electrical load of a coal mine, which, depending on its new level, may have both negative and positive consequences for the enterprise's power supply system. Under such conditions, determining a new value of the maximum electrical load using known methods will not allow obtaining a correct result due to the failure to consider the modern trends for regulating the power consumption modes.

Therefore, the article proposes to determine the maximum electrical loads of coal mines based on modeled group power consumption profiles, taking into account the new operating modes of technological plants which meet the requirements of the enterprise's power supply system (centralized or decentralized). To this end, the authors have classified the mine's electrical receivers according to the indicators of their individual electrical loading diagrams into three groups - with uniform, stage and random power consumption. This made it possible to determine the constant and random components of the group daily power consumption profile for a coal mine.

daily power consumption profile, dispersion, electric loading diagram, coal mine

Одержано (Received) 07.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 07.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 13.05.2025

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.396.67+621.396.946 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.184-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.184-189)

В. К. Бондарчук, А. М. Мацуй, проф., д-р техн. наук, **В. М. Каліч**, проф., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: barbaross2@ukr.net

Методи електромагнітного тестування та діагностики радіоантен покоління 5G

Виконано огляд ключових технологій телекомунікаційних бездротових систем п'ятого покоління, особливості яких вимагають зміни в підходах до тестування радіо компонентів. Зроблено порівняльний огляд сучасних підходів до післявиробничого неінвазійного тестування активних антенних систем та можливостей використання елементів машинного навчання для підвищення ефективності виявлення дефектів.

5G, електромагнітне тестування, ОТА, машинне навчання, виявлення дефектів

Постановка проблеми. Сучасні телекомунікаційні мережі широко використовують активні антенні системи для передачі інформації, а з їх розвитком, особливо через нові і нові вимоги до кількості передаваної інформації та швидкості передачі зростає складність цих систем. Особливо в останніх стандартах мереж 5 покоління, в яких потрібно використовувати системи massive MIMO (mMIMO), які представляють собою масиви антен міліметрового діапазону, кількість елементів в яких досягає сотні і більше.

Незважаючи на те, що mMIMO існують вже декілька десятиліть, досі не вирішено питання їх ефективного тестування, при мінімізації часу та витрат. Збільшення кількості елементів в антенній системі та зменшення їх лінійних розмірів призводить до того, що класичні методи тестування, не можуть бути використані через збільшення часу та загальної складності тестувальної системи. В даній статті розглядаються сучасні неінвазійні методи тестування та виявлення дефектів радіоантен п'ятого покоління.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вимоги до об'ємів даних та швидкості їх передачі ростуть з кожним новим поколінням телекомунікаційних мереж, а це в свою чергу призводить до ускладнення структури телекомунікаційного обладнання, що підвищує можливу кількість точок відмови. Основним завдання післявиробничого тестування та діагностики антен є зменшення кількості браку та ефективне виявлення дефектів. При чому існують обмеження на час діагностики, розміри тестувальних стендів, та людських ресурсів, які задіяні в тестуванні. У зв'язку з чим ведеться розробка методів, які дозволяють зменшити кількість операцій під час тестування, оптимізувати обчислення параметрів сигналу, що передається або приймається [1], автоматизувати частину процесів тестування за допомогою використання робототехніки або використати елементи машинного навчання для більш глибокої діагностики [2].

Постановка завдання. Метою даної статті є огляд основних елементів систем п'ятого покоління та методів, які використовуються для електромагнітного тестування та діагностики активних антенних систем для виявлення дефектів.

Виклад основного матеріалу. 5G представляє собою п'яте покоління бездротових систем, стандартом цієї технології визначено New Radio (далі - NR) у 2018 році [3]. Мережі п'ятого покоління зазвичай працюють в діапазоні частот від 24 ГГц до 40 ГГц та використовують massive MIMO для розширення ємності та покриття. Мережі

5G, що використовують технологію mmWave або міліметрових хвиль, можуть забезпечити достатню пропускну здатність (діапазон частот 5G mmWave) для збільшення кількості пристроїв, підключених до Інтернету, і з цієї причини 5G mmWave розширює сферу їх застосування, наприклад, автономні транспортні засоби, телемедицина, управління дорожнім рухом, криті торгові центри, освітні центри, стадіони, конференц-центри та інші види використання, що потребують передачі великого об'єму даних. До ключових елементів 5G відносять [4]:

Millimeter-Wave (mmWave). Технологія міліметрових хвиль є ключовою технологією для стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G). Вона використовує радіочастоти в діапазоні NR FR-I (від 410 МГц до 7,125 МГц) та FR-II (від 24 ГГц до 52 ГГц). Ці вищі діапазони дозволяють збільшити швидкість передачі даних, зменшити затримку та збільшити пропускну здатність. Проблема використання технології mmWave полягає в тому, що вищі частоти мають коротші довжини хвиль, а це означає, що сигнали більш схильні до згасання через перешкоди, такі як будівлі та рослинність. Щоб подолати цю проблему мережі що використовують технологію mmWave, зазвичай потребують більшої кількості базових станцій або точок доступу, які встановлюються ближче одна до одної.

Також сигнали mmWave більш чутливі до перешкод від інших бездротових сигналів, а також до метеорологічних умов, таких як дощ і туман. Щоб зменшити ці проблеми мережі 5G що використовують технологію mmWave, застосовують передові методи обробки сигналів і формування променя (beamforming) для фокусування сигналів у певних напрямках, що покращує якість сигналу та зменшує перешкоди. Незважаючи на ці проблеми, технологія mmWave пропонує значні переваги для мереж 5G, включаючи вищу швидкість передачі даних, меншу затримку та підвищену ємність.

MIMO/m-MIMO. Принцип роботи системи зв'язку з MIMO полягає у одночасному використанні великої кількості передавальних і приймальних елементів, що дозволяє проводити просторову і часову обробку сигналів, ефективніше використовувати потужність передавача і зменшувати вплив завад (рис.1).

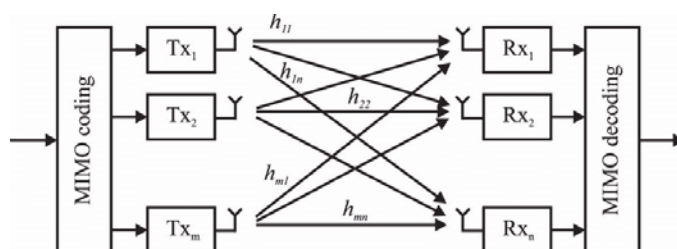


Рисунок 1 – Принципова структура активної антенної системи з МІМО

Джеперло: https://www.researchgate.net/figure/The-transmission-of-information-flow-scheme-for-MIMO-systems_fig1_332435957

Massive MIMO працює за допомогою складних алгоритмів обробки сигналів для розділення різних сигналів, що передаються та приймаються кількома антенами. В пристроях 5-ого покоління кількість цих елементів може доходити до декількох сотен, але через обмеження в лінійних розмірах передавача і приймача відбувається зменшення розміру самих передавальних елементів, які об'єднуються в масиви елементів.

Beamforming. Beamforming або формування променя передбачає спрямовану передачу та прийом сигналів між базовою станцією та користувацьким обладнанням. Воно використовує кілька антен для створення вузьких променів, які можна спрямувати на певних користувачів або пристрої, а не для трансляції сигналів у всіх напрямках. Це дозволяє операторам забезпечувати вищі швидкості передачі даних, краще покриття та ефективніше використовувати доступний спектр. Формування променя є критично важливою технологією для міліметрових хвиль (mmWave), які використовуються в деяких мережах 5G для забезпечення надзвичайно високих швидкостей передачі даних.

Міліметрові хвильові частоти мають високі втрати на поширення, а це означає, що вони легко поглинаються об'єктами на своєму шляху, такими як будівлі та дерева. Формування променя дозволяє операторам подолати ці втрати на поширення, спрямовуючи сигнал на певних користувачів або пристрої, а не для трансляції його в усіх напрямках (рис.2).

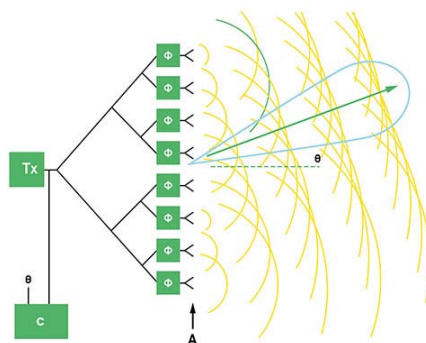


Рисунок 2 – Принципова схема активної антенної системи з адаптивним формуванням променя сигналу
Джерело: <https://my.avnet.com/abacus/solutions/markets/communications/5g-solutions/5g-beamforming/>

Класифікація методів тестування і виявлення дефектів. Якщо казати про забезпечення якості 5G-антен, то під час виробництва використовуються велика кількість методів для гарантування їх надійності та ефективності. Ретельне тестування дозволяє виявляти дефекти ще на ранніх етапах, що значно знижує ймовірність браку на виході з виробництва. Крім того, сучасні технології відкривають нові можливості для автоматизації та підвищення точності діагностики. Частина з методів полягає в структурному аналізі виробу, до них належать візуальна інспекція (за допомогою видимого світла, ультразвуку, рентгенівського випромінювання), термографія (аналіз температурних аномалій, які виникають під час використання приладу), контроль геометрії тощо.

Одним з непрямих методів, який використовують, являє собою електромагнітне сканування. Цей метод ефективно ідентифікує відхилення в характеристиках випромінювання окремих елементів, що може свідчити про наявність дефектів.

В попередніх стандартах основним методом електромагнітного сканування антенних систем був conductive-методу, який полягав у використанні дротового з'єднання від передавачів антенної системи до вимірювального обладнання. Але у випадку 5G через використання mMIMO кількість передавачів/приймачів збільшилась, а їх лінійні розміри зменшились, що значно підвищило складність дротового під'єднання передавально-приймачних елементів, вартість цього процесу, особливо в людських ресурсах, які задіяні, а також в деяких випадках взагалі унеможливило дротове підключення.

Якщо казати про електромагнітне тестування антен без фізичного підключення виділяють два підходи [5]:

Тестування в ближньому полі (Near-Field). Передбачає вимірювання електромагнітного поля поблизу антени, де хвильовий фронт ще не став плоским. Цей метод дозволяє отримати детальну інформацію про розподіл поля, що особливо корисно для складних антенних систем, таких як фазовані решітки. Однак для отримання характеристик у дальньому полі необхідно застосовувати математичні перетворення, наприклад, перетворення Фур'є. Це додає складності до процесу тестування та вимагає високої точності вимірювань.

Тестування в дальньому полі (Far-Field). У дальньому полі електромагнітні хвилі мають плоский фронт, що спрощує аналіз характеристик випромінювання антени. Для забезпечення умов дальнього поля необхідно розмістити антену на відстані, що перевищує дистанцію Фраунгофера, яка визначається за формулою:

$$d = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

де D – найбільший лінійний розмір антени, λ – довжина хвилі.

Це може вимагати великих анехоїчних (anechoic) камер, особливо для антен, що працюють на міліметрових хвилях.

Найбільш поширеним методом електромагнітного сканування та діагностики антен є REV (Relative Element Value) [6]. Він полягає у вимірюванні амплітуд та фаз сигналів, що випромінюються кожним окремим елементом активної антенної решітки і у порівнянні результуючого поля, створеного антенною, при контрольованій зміні фази або амплітуди одного елемента, у той час як всі інші елементи залишаються незмінними. До переваг цього методу належить насамперед відсутність необхідності в фізичному підключенні та висока точність, але через те, що кожен елемент налаштовується окремо, збільшується час, необхідний для налаштування кожного елемента, що особливо відчутно у Massive MIMO системах.

Загалом тестування через повітря називають Over-The-Air (OTA)-тестування. Воно є ключовим етапом у процесі сертифікації та контролю якості сучасних бездротових пристроїв. OTA-тестування є обов'язковим для 5G-пристроїв, оскільки багато з них мають інтегровані антени без можливості прямого підключення. Такий підхід дозволяє оцінити реальні характеристики випромінювання в умовах, близьких до експлуатаційних. 3GPP (об'єднання телекомунікаційних організацій, яке займається розробкою стандартів для мобільного зв'язку) визначає три основні методи OTA-тестування [7]:

- пряме тестування в дальньому полі (DFF): потребує великої відстані між пристроєм та вимірювальним обладнанням, що може бути непрактично для міліметрових хвиль;

- непряме тестування в дальньому полі (CATR): використовує параболічні рефлектори для створення умов дальнього поля в компактному просторі, що зменшує розміри необхідної камери;

- перетворення з ближнього поля в дальнє (NFTF): застосовує математичні методи для обчислення характеристик дальнього поля на основі вимірювань у ближньому полі [8].

Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, і вибір залежить від конкретних вимог тестування. Порівняння OTA-методів показано в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння методів OTA-тестування

Метод тестування	Переваги	Недоліки
<i>DFF</i>	Простота реалізації	Великі розміри камери, високі втрати шляху
<i>CATR</i>	Компактність, зменшені втрати	Складність конструкції, висока вартість
<i>NFTF</i>	Можливість тестування в обмеженому просторі	Високі вимоги до точності вимірювань та обчислень

Джерело: розроблено авторами

Оскільки кількість даних отримуваних під час електромагнітного сканування антен збільшується, і питома вага кожного елемента активної антени відповідно зменшується, то класичні математичні методи вже не справляються з вимірюванням, і тому останнім часом почали широко використовувати інтелектуальні методи (ШІ) діагностики, які використовують дані, отримані під час OTA-тестування, для виявлення та прогнозування дефектів у 5G-антенах. Ці методи включають машинне навчання, аналіз великих даних та предиктивну аналітику.

Машинне навчання: класифікація дефектів за допомогою нейронних мереж дозволяє класифікувати дефекти антен на основі аналізу сигналів, отриманих під час

ОТА-тестування. Наприклад, використання глибоких нейронних мереж (DNN) для аналізу базових сигналів у фазі та квадратурі дозволяє швидко та точно виявляти несправні елементи в антенних масивах [2]. Згорткові нейронні мережі (CNN) було запропоновано використовувати для аналізу записаного радіосигналу [9] та діагностики активних антен [10], що дозволяє детектувати тип та характер отриманих даних.

Аналіз великих даних: виявлення закономірностей у виникненні дефектів. Аналіз великих обсягів даних, отриманих під час ОТА-тестування, дозволяє виявляти закономірності та тренди, пов'язані з виникненням дефектів у 5G-антенах, а оскільки характер сигналу, що передається залежить від кожного компоненту передавача, то можна локалізувати причину дефектів сигналу за допомогою використання методів обробки та аналізу даних, таких як кластеризація та асоціативний аналіз.

Предиктивна аналітика: прогнозування відмов антен. Предиктивна аналітика використовує історичні дані ОТА-тестування для прогнозування майбутніх відмов антен. Моделі машинного навчання, такі як регресійний аналіз та дерева рішень, дозволяють передбачити ймовірність виникнення дефектів, що сприяє своєчасному технічному обслуговуванню та зменшенню простой обладнання.

Інтеграція інтелектуальних методів діагностики в процес ОТА-тестування 5G-антен значно підвищує ефективність виявлення та прогнозування дефектів, що сприяє покращенню якості та надійності телекомунікаційного обладнання.

Висновки. В статті було проведено аналіз існуючих методів електромагнітного тестування і засобів телекомунікаційних мереж п'ятого покоління 5G. Встановлено, що впровадження даних систем призвело до ускладнення активних антенних систем і, як наслідок, до ускладнення процесу тестування та діагностики. Порівняння методів електромагнітного тестування та діагностики дозволило визначити їх основні переваги і недоліки. Виявилось, що деякі класичні методи стали неможливими у масовому виробництві, в той же час, як процес електромагнітного тестування потребує вдосконалення та оптимізації. Найбільш перспективними є методи оптимізації з використанням елементів машинного навчання. Тому метою подальших досліджень є розробка автоматичної системи тестування та діагностики, яка буде використовувати інтелектуальні методи.

Список літератури

1. Parini C. G., Gregson S. F. Recent *Advances in Compressive Sensing for Production Test and Antenna Diagnostics of 5G Massive MIMO Antennas* : [презентовано на 2024 Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA), листопад 2024 р.]. URL: https://nextphasemeasurements.com/wp-content/uploads/2024/11/AMTA_2024_PNF_CS_Paper-ver6.pdf (дата звернення: 13.04.2025).
2. Nielsen M. H., Zhang Y., Xue C., Ren J., Yin Y., Shen M., Pedersen G. F. *Robust and Efficient Fault Diagnosis of mm-Wave Active Phased Arrays using Baseband Signal* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2022. Vol. 70, No. 7. P. 5044–5053. DOI: [10.1109/TAP.2022.3179898](https://arxiv.org/abs/2306.04360). URL: <https://arxiv.org/abs/2306.04360> (дата звернення: 13.04.2025).
3. Sultan A. *5G System Overview* / 3GPP. (Серпень 2022). URL: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview> (дата звернення: 14.04.2025).
4. Raj T., Mishra R., Kumar P., Kapoor A. *Advances in MIMO Antenna Design for 5G: A Comprehensive Review*. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 14. Article ID 6329. DOI: [10.3390/s23146329](https://www.mdpi.com/1424-8220/23/14/6329). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/14/6329> (дата звернення: 14.04.2025).
5. LitePoint. *LitePoint's Complete Guide to 5G OTA Testing*. 2019. URL: <https://www.litepoint.com/wp-content/uploads/2019/07/5G-OTA-article-060419-web.pdf> (дата звернення: 12.04.2025).
6. Mano S., Katagi T. *A method for measuring amplitude and phase of each radiating element of a phased array antenna* // Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications). 1982. Vol. 65, No. 5. P. 52–59. DOI: [10.1002/ecja.4410650508](https://doi.org/10.1002/ecja.4410650508).
7. 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network. NR Base Station (BS) Conformance Testing Part 2: Radiated Conformance Testing. Release 15. TS 38.141-2 V15.6.0. 2020.
8. Lin L., Loughran K., Bondarchuk V. *OTA Test and Calibration of Millimeter Wave Antenna Arrays*. *Microwave Journal*. (Серпень 2024). URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/42445-ota-test-and-calibration-of-millimeter-wave-antenna-arrays> (дата звернення: 17.04.2025).
9. O'Shea T. J., Corgan J., Clancy T. C. *Convolutional Radio Modulation Recognition Networks*. arXiv preprint arXiv:1602.04105. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1602.04105> (дата звернення: 15.04.2025).

10. Zheng G., Zhang Q., Li S. Failure Diagnosis of Antenna Array Using Residual Convolutional Neural Network. 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium. 2021. P. 1–2. DOI: [10.23919/ACES-China52398.2021.9581935](https://doi.org/10.23919/ACES-China52398.2021.9581935)

References

1. Parini, C. G., & Gregson, S. F. (2024, November). *Recent advances in compressive sensing for production test and antenna diagnostics of 5G massive MIMO antennas*. Presented at the 2024 Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA). https://nextphasemeasurements.com/wp-content/uploads/2024/11/AMTA_2024_PNF_CS_Paper-ver6.pdf
2. Nielsen, M. H., Zhang, Y., Xue, C., Ren, J., Yin, Y., Shen, M., & Pedersen, G. F. (2022). Robust and efficient fault diagnosis of mm-wave active phased arrays using baseband signal. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(7), 5044–5053. <https://arxiv.org/abs/2306.04360>
3. Sultan, A. (2022, August). *5G system overview*. 3GPP. <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>
4. Raj, T., Mishra, R., Kumar, P., & Kapoor, A. (2023). Advances in MIMO antenna design for 5G: A comprehensive review. *Sensors*, 23(14), 6329. <https://doi.org/10.3390/s23146329>
5. LitePoint. (2019). *LitePoint's complete guide to 5G OTA testing*. <https://www.litepoint.com/wp-content/uploads/2019/07/5G-OTA-article-060419-web.pdf>
6. Mano, S., & Katagi, T. (1982). A method for measuring amplitude and phase of each radiating element of a phased array antenna. *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, 65(5), 52–59. <https://doi.org/10.1002/ecja.4410650508>
7. 3GPP. (2020). *NR base station (BS) conformance testing Part 2: Radiated conformance testing* (TS 38.141-2 V15.6.0; Release 15).
8. Lin, L., Loughran, K., & Bondarchuk, V. (2024, August). OTA test and calibration of millimeter wave antenna arrays. *Microwave Journal*. <https://www.microwavejournal.com/articles/42445-ota-test-and-calibration-of-millimeter-wave-antenna-arrays>
9. O'Shea, T. J., Corgan, J., & Clancy, T. C. (2016). Convolutional radio modulation recognition networks. *arXiv preprint arXiv:1602.04105*. <https://arxiv.org/abs/1602.04105>
10. Zheng, G., Zhang, Q., & Li, S. (2021). Failure diagnosis of antenna array using residual convolutional neural network. In *2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium* (pp. 1–2). <https://doi.org/10.23919/ACES-China52398.2021.9581935>

Viktor Bondarchuk, Anatolii Matsui, Prof., Dr. tech. sci., **Viktor Kalich**, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of Electromagnetic Testing and Defect Detection Tools for 5G Generation Radio Antennas

The purpose of this article is to review the key elements of fifth-generation (5G) wireless systems and the methods used for electromagnetic testing and defect detection of active antenna systems. Due to the introduction of massive MIMO technologies and millimeter-wave (mmWave) communication in 5G networks, traditional testing approaches are no longer effective, prompting the need for new non-invasive methods. The article aims to analyze current approaches to post-production non-invasive testing of active antenna systems and explore the potential of machine learning elements to enhance the efficiency of defect detection.

The study begins with an overview of the technological features of 5G systems, including the use of millimeter-wave frequency bands, massive MIMO antenna arrays, and beamforming techniques, which have increased the complexity of telecommunication equipment. A classification of electromagnetic testing methods is provided, comparing conductive testing methods with non-invasive Over-The-Air (OTA) techniques such as Direct Far-Field (DFF), Compact Antenna Test Range (CATR), and Near-Field to Far-Field (NFTF) transformations. The paper also discusses the use of electromagnetic scanning, including Relative Element Value (REV) methods, for diagnosing antenna defects without physical connections. Given the increasing volume of testing data, the work highlights the integration of machine learning techniques, including deep neural networks and convolutional networks, for defect classification, big data analysis for pattern detection, and predictive analytics for forecasting antenna failures. Special attention is given to how artificial intelligence methods enhance the effectiveness and accuracy of defect diagnosis in modern 5G systems.

In conclusion, the study shows that the growing complexity of active antenna systems in 5G networks necessitates the evolution of testing methodologies. Traditional conductive approaches are no longer viable for large-scale production, and non-invasive OTA testing has become the standard. Electromagnetic scanning, combined with machine learning techniques, significantly improves defect detection rates and diagnostic accuracy. Integrating intelligent diagnostic methods into the 5G antenna testing process enables better quality control, reduced production losses, and enhanced reliability of telecommunication equipment.

5G, electromagnetic testing, OTA testing, machine learning, defect detection

Одержано (Received) 11.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 25.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 02.05.2025

УДК 62.505

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.190-194](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.190-194)

О. К. Дідик, доц., канд. техн. наук, О. М. Сербул, доц., канд. техн. наук, С. В. Тесля
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: didyk_s79@ukr.net

Аналіз об'єкта керування для розробки системи автоматичної стабілізації завантаження молотарки зернозбирального комбайну

В статті приводиться аналіз об'єкта керування, розглядаються фактори, що ускладнюють досягнення максимальної якості стабілізації завантаження молотарки, серед яких розглядаються динамічні характеристики елементів об'єкта керування, динамічні характеристики збурень, що діють на об'єкт керування.
об'єкт керування, стабілізація завантаження молотарки, зернозбиральний комбайн

Постановка проблеми. Для досягнення максимальної якості стабілізації завантаження молотарки зернозбирального комбайну необхідно застосовувати методи динамічного проектування та аналітичного конструювання при побудові оптимальної системи [1]. Перед розробкою системи потрібно проаналізувати фактори, врахування яких дасть можливість досягти необхідної якості. Дані фактори можна розділити на три групи: динамічні характеристики елементів системи автоматичної стабілізації; динамічні характеристики збурень, що діють в системі; шуми вимірювачів.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Зернозбиральний комбайн є досить складним об'єктом, що включає нелінійні елементи, нестационарні елементи та складні взаємозв'язки між елементами. В літературі [2,3] описана велика кількість математичних моделей як окремих вузлів так і великих агрегатів та навіть і всього комбайну. Дані моделі складаються для вирішення різних задач.

Характерною ознакою сучасного розвитку систем автоматизації керування технологічними процесами на вітчизняних та зарубіжних комбайнах [1-3] є застосування новітніх методів, прийомів та засобів розробки бортових систем керування. Новітні методології створення систем керування дозволяють враховувати реальний стохастичний характер зміни сигналів, які діють у контурах керування та визначати структуру, а не тільки параметри, бортового регулятора, які доставляють екстремум обраному критерію якості.

З точки зору динамічних характеристик найскладнішим елементом системи є об'єкт керування, входом якого є кут нахилу шайби блоку циліндрів гідронасоса, а виходом – потік хлібної маси на вході в молотарку.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз об'єкта керування системи автоматичної стабілізації завантаження молотарки зернозбирального комбайна. З позиції задачі стабілізації завантаження молотарки необхідно одержати модель узагальненого об'єкта керування, а саме динамічні характеристики елементів об'єкта керування, динамічні характеристики збурень, що діють на об'єкт керування.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо модель узагальненого об'єкта керування „кут нахилу шайби блоку циліндрів – потік хлібної маси на вході у молотарку” (рис. 1), до якої входять гідротрансмісія (ГСТ), що змінює частоту обертів вала гідромотора ω в залежності від кута нахилу шайби блоку циліндрів гідронасоса γ , трансмісія комбайна (К), що перетворює обертання вала гідромотора в поступальний

рух комбайна та математична залежність, що пов'язує потік хлібної маси Q з поступальною швидкістю комбайну V

$$Q = VBY(1 + \varepsilon), \quad (1)$$

де Q – потік хлібної маси на вході в молотарку комбайна, кг/с; V – швидкість комбайна, м/с; B – ширина захвату жатки, м; Y – урожайність культури, кг/м²; ε – відношення зерна до незернової частини хлібної маси.

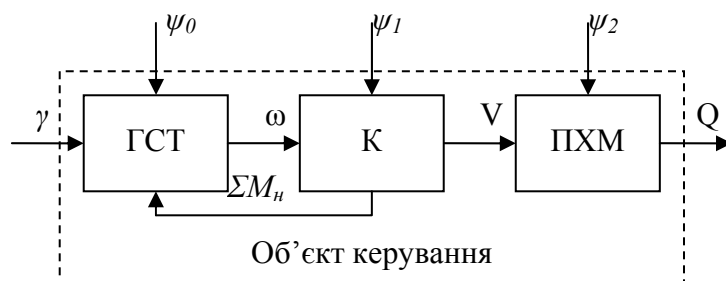


Рисунок 1 – Структура об'єкта керування

Джерело: розроблено автором

На об'єкт керування впливають збурення ψ_i , причому точки прикладання їх різні. Також в об'єкті керування є внутрішній зворотній зв'язок, який обумовлений сумарним впливом моментів сил ΣM_n , пов'язаних з поступальним рухом комбайна, на частоту обертання вала гідромотора.

Розглянемо кожен елемент об'єкта керування окремо. На сьогоднішній день більшість сучасних комбайнів використовують гідротрансмісію для керування швидкістю поступального руху. Гідротрансмісія досить складний технічний об'єкт.

Розглянемо математичну модель. При виведенні даної моделі було прийнято деякі припущення. Двигун обертає вал насоса з постійною кутовою швидкістю Ω_p . Під час роботи гідроприводу тиски в трубопроводах не досягають значень, при яких відкриваються запобіжні клапани. Тиск p_s у магістралі перед підживлювальними клапанами підтримується постійним. Зусилля, подолані гідромотором при керуванні об'єктом, можуть бути представлені сумою моментів від дії приведених до вала гідромотора інерційного навантаження, позиційного навантаження й гідравлічного тертя. Трубопроводи будемо приймати настільки короткими, щоб можна було зневажати інерцією рідини й втратами тиску в них через опір тертя.

Ця модель розглянута в роботах [4,5], де одержана передаточна функція для кутової швидкості вала гідромотора Ω по куту нахилу блоку циліндрів (або шайби) γ , при описаних вище припущеннях

$$W_{\Omega\gamma}(s) = \frac{\Omega(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{T_{hd}(T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)}, \quad (2)$$

де $T_{hd} = \frac{q_m}{2\pi k_{Q\gamma}}$ – постійна часу гідроприводу;

$T_m = \sqrt{\frac{2\pi^2 J W_0}{q_m^2 E_f}}$ – постійна часу гідромотора;

$\zeta_m = \frac{\pi(2J E_f k_{\Sigma} + k_{fr} W_0)}{\sqrt{2J W_0 E_f q_m^2}}$ – коефіцієнт відносного демпфування гідромотора;

q_m – робочий об'єм гідротрансмісії;

W_0 – внутрішній об'єм трубопроводу з урахуванням підключених до нього об'ємів порожнин гідромотора та насоса;

E_f – об'ємний модуль пружності робочої рідини;

k_{QY} – коефіцієнт лінеаризації відношення подачі насоса до кута нахилу шайби;
 J – момент інерції обертових з валом гідромотора частин;
 k_{fr} – коефіцієнт моменту тертя.

Розглянемо сили та моменти, що супроводжують поступальний рух зернозбирального комбайна, які описуються в теорії руху колісних машин. Всі сили та моменти, що діють на комбайн можна поділити на зовнішні та внутрішні. Зовнішніми по відношенню до комбайна є сили, що діють зі сторони навколишнього середовища, тобто дороги та повітря. Ці сили можна розділити на активні та пасивні. Перші можуть бути або рушійними силами, або силами опору руху, залежно від того яку роботу вони виконують. Пасивні сили – це сила тяжіння та нормальні реакції.

Сила опору повітря P_w відноситься до активних сил опору та зумовлена тертям в прилеглих до поверхні машини шарах повітря, стисненням повітря рухомою машиною, розрідженням за машиною, вихроутворенням в шарах повітря, що оточують машину. Чим більша площа поперечного перерізу, тим більша кількість повітря повинна огинати машину. Складова сили опору повітря, що залежить від цієї площі називається лобовим опором, є основною частиною всієї сили опору повітря.

На опір руху машини в деякому середовищі впливають щільність даного середовища та швидкість руху машини. Щільність повітря на певній висоті над рівнем моря можна вважати постійною. Вплив швидкості руху машини на силу опору повітря значний. Якщо при швидкостях порядку одиниць кілометрів за годину сила прямопропорційна швидкості, то при значних швидкостях руху сила опору повітря пропорційна квадрату швидкості. Оскільки під час збиранні зернових комбайн рухається з невеликими швидкостями, то будемо вважати силу опору повітря прямопропорційною швидкості руху комбайна.

Силу тяжіння машини G_m можна розкласти на дві складові: $G_m \cos \alpha$ та $G_m \sin \alpha$. При русі по негоризонтальній поверхні друга складова є активною силою: силою опору руху, якщо машина рухається вгору, і рушійною силою, якщо рухається вниз. Отже, складова $G_m \sin \alpha$ залежить від макрорельєфу поля і має суттєвий вплив на швидкість руху комбайна. Дана складова враховується у якості позиційного навантаження $M_{\text{поз}}$.

Також значний вплив на динаміку руху комбайна має сила інерції, оскільки комбайн має велику масу порядку 10-15 тонн. Інші сили та моменти, що супроводжують поступальний рух комбайна порівняно мало впливають на динамічні властивості об'єкта керування.

Розглянемо збурення, що діють на об'єкт керування. При виведенні математичної моделі гідротрансмісії були описані деякі припущення, але в реальних умовах експлуатації гідротрансмісія являє собою складний об'єкт з нелінійними та нестаціонарними елементами. Дані властивості об'єкта практично неможливо врахувати при аналітичному виводі математичної моделі. Тому при складанні моделі описані вище припущення будуть враховані у якості внутрішніх збурень ψ_0 , що діють на гідротрансмісію.

Що стосується збурень ψ_1 (рис. 1), що супроводжують поступальний рух комбайна та впливають на його швидкість, то серед них можна виділити нерівномірність рельєфу поля, пориви вітру, проковзування ремінних передач та ін. Основний вплив має нерівномірність рельєфу поля. Звичайно мова не йде про мікрорельєф, більш визначальною є динаміка зміни макрорельєфу поля.

Класифікація спектральних щільностей профілю ґрунтових доріг та місцевості виконується по трьом основним показникам: рівню нерівностей макропрофіля (довжина хвилі $\lambda > 100$ м); рівню і характеру нерівностей мікропрофілю ($\lambda \approx 10$ м); рівню коротких нерівностей мікропрофілю ($\lambda < 1$ м).

Нерівності макропрофілю мають спектральну щільність виду

$$S(\lambda) = D_M / \lambda^2 \quad (3)$$

За даними нерівностями місцевість класифікується: дуже рівна місцевість ($D_M = 10^{-4}$ м); рівнинна місцевість ($D_M = 10^{-3}$ м); помірна горбиста ($D_M = 10^{-2}$ м); горбиста і сильно пересічена ($D_M = 10^{-1}$ м); горна ($D_M = 10^0$ м). Для хвиль довжиною більше 1 км рівень спектральної щільності визначається виключно характером місцевості.

Для нерівностей середньої довжини спектральну щільність приблизно можна представити у вигляді

$$S(\lambda) \approx D_C / \lambda^n \quad (0 \leq n \leq 4) \quad (4)$$

Різним значенням D_C відповідають наступні рівні спектральної щільності нерівностей довжиною порядку 10 м: $D_C \approx 3 \cdot 10^{-4} \div 10^{-3}$ – малий (мало зношена ґрунтова дорога, рівне поле); $D_C \approx 3 \cdot 10^{-3}$ – середній; $D_C \approx 10^{-2}$ – великий; $D_C \approx 3 \cdot 10^{-2} \div 10^{-1}$ – дуже великий (із-за валів довжиною 5 м рух машин практично неможливий).

Для коротких нерівностей спектральна щільність може бути задана

$$S(\lambda) \approx D_K / \lambda^2 \quad (5)$$

Різним значенням D_K відповідають різні рівні коротких нерівностей: $D_K = 10^{-5} \div 10^{-4}$ – дуже малий (укатані ґрунтові дороги); $D_K = 10^{-4} \div 10^{-3}$ – малий (ґрунтові дороги задовільної якості, рівне поле без горбків і явно виражених коротких нерівностей); $D_K = 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-3}$ – середній (розбиті ґрунтові дороги, поле без явно виражених горбків); $D_K = 3 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2}$ – великий (сильно розбиті ґрунтові дороги, поле з великим рівнем коротких нерівностей, місцевість з неоднорідним ґрунтом і каменистими вклученнями, оранка); $D_K = 10^{-2} \div 3 \cdot 10^{-2}$ – дуже великий (луг з дуже високими горбками, крупне каміння).

Розглянемо збурення ψ_2 , що впливають на потік хлібної маси. З виразу (1) видно, що на потік хлібної маси окрім швидкості руху комбайну впливають урожайність культури, ширина захвату жатки та відношення зерна до незернової частини хлібної маси. Серед них основний вплив на нерівномірність потоку звичайно має урожайність культури. Оскільки ширина захвату жатки контролюється комбайнером або відповідними автоматичними системами і підтримується на заданому рівні з незначними коливаннями. Відношення зерна до незернової частини хлібної маси залежить від висоти стеблостою і також може підтримуватися за допомогою зміни висоти зрізу стебла в ручному або автоматичному режимі. Тоді як на урожайність в процесі збору вплинути неможливо.

Для визначення спектральної щільності зміни урожайності по ходу руху комбайна необхідно проаналізувати карти урожайності полів для відповідного регіону.

Висновки. Аналіз показав, що кожна складова об'єкта керування є досить складним механізмом, на який діють складні стохастичні зовнішні та внутрішні впливи. Одержати аналітично модель динаміки об'єкта керування яка б, з одного боку, була достатньо простою для успішного вирішення задач розробки системи керування, а з іншого враховувала головні фактори, що впливають на якість процесу стабілізації потоку хлібної маси в реальних умовах функціонування досить складно. Отже для вирішення задачі стабілізації потоку хлібної маси пропонується застосування експериментально-аналітичної концепції визначення моделі динаміки об'єкта керування та збурень, що діють на нього.

Список літератури

1. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів : монографія / Л. М. Блохін та ін., Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2023. 292 с.

2. Войтюк Д. Г., Яцун С. С., Довжик М. Я. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: навч. посібник / За ред.: Д. Г. Войтюка. Суми: Університетська книга, 2008. 43 с.
3. Проектування сільськогосподарських машин: навч.-метод. посібник / І. М. Бендера та ін., Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В. Абетка, 2010. 640 с.
4. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Vol. 17. No 1. 2017. P. 27-32.
5. Sokolov V., Krol O., Stepanova O., Tsankov P. Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*. 2020. Vol. 73. No 5. P. 691-702.

References

1. Blohin L.N., Osadchyi S.I., Didyk O.K. et al. (2023) Technologies for designing modern competitive complexes for controlling stochastic movement of objects. *Kropyvnyts'kyi: Lysenko V.F.* [in Ukrainian].
2. Voitiuk D. H., Yatsun S. S., Dovzhyk M. Ya. (2008) Agricultural machinery: basics of theory and calculation. Sumy: Universytets'ka knyha [in Ukrainian].
3. Bendera I. M., Rud' A.V., Koziy YA.V. et al. (2010) Design of agricultural machines: teaching-methodical manual. Kam'yanets'-Podil's'kyi : FOP Sysyn O.V. Abetka [in Ukrainian].
4. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Vol. 17. No 1. 2017. P. 27-32.
5. Sokolov V., Krol O., Stepanova O., Tsankov P. Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*. 2020. Vol. 73. No 5. P. 691-702.

Oleksandr Didyk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Serbul**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhiy Teslya**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of the Control Object for the Development of a System for Automatic Stabilization of the Loading of the Threshing Machine of a Combine Harvester

This article provides an analysis of the control object, considers factors that complicate the achievement of maximum quality stabilization of the threshing machine loading, including the dynamic characteristics of the elements of the control object, the dynamic characteristics of the disturbances acting on the control object.

To achieve the maximum quality of stabilization of the threshing machine loading of a combine harvester, it is necessary to apply methods of dynamic design and analytical construction when building an optimal system. Before developing the system, it is necessary to analyze the factors, the consideration of which will allow achieving the required quality. These factors can be divided into three groups: dynamic characteristics of the elements of the automatic stabilization system; dynamic characteristics of disturbances acting in the system; noise of the meters.

From the point of view of dynamic characteristics, the most complex element of the system is the control object, the input of which is the angle of inclination of the washer of the hydraulic pump cylinder block, and the output is the flow of grain mass at the entrance to the threshing machine. From the position of the problem of stabilizing the threshing machine loading, it is necessary to obtain a model of a generalized control object, namely, the dynamic characteristics of the elements of the control object, the dynamic characteristics of the disturbances acting on the control object

Each component of the control object is a rather complex mechanism, which is affected by complex stochastic external and internal influences. It is quite difficult to obtain an analytical model of the dynamics of the control object, which, on the one hand, would be simple enough to successfully solve the problems of developing a control system, and on the other hand, would take into account the main factors affecting the quality of the process of stabilizing the flow of grain mass in real operating conditions. Therefore, to solve the problem of stabilizing the flow of grain mass, it is proposed to use the experimental-analytical concept of determining the model of the dynamics of the control object and the disturbances acting on it.

control object, threshing machine loading stabilization, combine harvester

Одержано (Received) 19.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025

UDC 681.5.004.8

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.195-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.195-203)

Serhii Kovalov¹, PhD ped. sci., Viktor Aulin¹, Prof., DSc., Andriy Grynkyiv¹, PhD tech. sci., Yuriy Kovalov², PhD tech. sci.

¹Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

²Ukrainian State Flight Academy, Stepana Chobanu Street 1, 25005, Kropyvnytskyi, Ukraine

e-mail: aulinvv@gmail.com, kovalyovserggr@ukr.net

Modeling the Stochastic State Matrix of a Production Line for Optimize its Operational Reliability Using Reinforcement Learning

The development of a production line state determination model aims to create a universal tool for evaluating and optimizing industrial systems. The proposed approach enables real-time analysis of equipment states, prediction of potential failures, and enhancement of overall operational efficiency.

The use of Markov chains allows for precise modeling of the sequence of production line states and the probabilities of transitions between them. This stochastic approach improves adaptability to real-world manufacturing conditions, surpassing the capabilities of traditional deterministic methods.

The formation of a stochastic state matrix optimizes production processes through advanced data analytics and AI integration. This enables manufacturers to minimize downtime, enhance resource allocation, and improve overall productivity while maintaining operational stability.

Transition probability estimation is based on both historical databases and real-time sensor measurements, allowing the model to adapt to various equipment types and operating conditions. AI-driven optimization enhances failure prediction accuracy, ensuring the production line remains efficient under diverse scenarios. By integrating Markov chains with data-driven insights, the approach supports proactive failure prevention and strategic resource management, ultimately improving the reliability and performance of industrial systems.

production line, Artificial Intelligence, production automation, Markov chain theory, stochastic matrix

Problem Statement. The theory of reliability is a crucial component in the implementation of various technical processes, particularly in the functioning of production lines. High reliability ensures the continuity of the production process and minimizes the risks of failures and downtime [1]. One of the effective approaches to studying reliability is the Markov chain theory, which allows for accurate description of the states of production lines and modeling processes to assess their reliability [2]. The use of Markov chains helps identify potential failure points and optimize maintenance, significantly improving the overall efficiency of the production system.

The optimization of modern production lines requires the implementation of advanced technologies, particularly artificial intelligence. AI can significantly enhance the productivity and flexibility of production processes. Reinforcement learning (RL), as one of the most powerful AI techniques, allows systems to learn independently and make decisions based on received feedback [4, 5, 6]. This is particularly useful in production lines where rapid adaptation to changing conditions and optimization of operating parameters are necessary.

Modeling production lines based on the RL method allows achieving high reliability and stability. Thanks to the self-learning capability of RL algorithms, the system can not only maintain an optimal operating mode but also continuously improve its performance. Thus, the integration of artificial intelligence (AI) into the production process opens up new horizons for improving the efficiency and reliability of modern production lines.

Analysis of Recent Research and Publications. The reliability of an object is defined by its ability to maintain within specified limits the values of all parameters that characterize the object's ability to perform required functions under given operating modes and conditions,

maintenance, repair, storage, and transportation [1, 2]. Reliability is a complex property that depends on the product's purpose and application conditions. It consists of a combination of properties: reliability, durability, maintainability, and storability.

Durability, reliability, maintainability, and storability are the main parameters that determine the reliability of a production line. These parameters account for various aspects of equipment operation and help assess its ability to perform assigned functions over a long period. According to stochastic theory, these parameters are considered random variables that follow certain probabilistic distribution laws. Reliability can be evaluated by the probability of no failure over a specified period, typically described by an exponential distribution [1]:

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

where $P(t)$ - is the probability of no failure by time t ,
 λ - is the failure rate.

Maintainability is evaluated by the equipment's ability to quickly recover after a failure occurs. The mean time to repair is a critical metric in this context and is defined as the average time required to repair and restore the system to operational status. Durability describes the overall operational lifespan of the equipment until significant wear necessitates replacement or major overhaul. Storability reflects the equipment's ability to maintain its operational characteristics during prolonged storage or transportation. All these parameters are considered in stochastic reliability models, where, for example, the time to failure can be described by a gamma distribution [1]:

$$f(t) = \frac{\lambda^k t^{k-1} \exp(-\lambda t)}{(k-1)!} \quad (2)$$

where $f(t)$ - represents the probability density function,
 t - is the time,
 λ - is the rate parameter, and
 k - is the shape parameter.

Such an approach allows predicting the behavior of the production line and optimizing processes to improve its reliability. In the context of Markov chains, the reliability of a production line is determined through modeling the system states and transitions between them. The main idea is that the state of the system at any given moment depends only on its previous state and does not depend on how the system reached the previous state. This simplifies the analysis and evaluation of reliability [1, 2].

When applying Markov models to assess the reliability of a production line, possible states of the equipment, such as operational state, partial or complete failure, and transitions between these states are considered. The probabilities of transitions between states are determined based on statistical data on the reliability of components and the system as a whole.

Markov models allow determining such characteristics as mean time to failure, mean time to repair, and other reliability indicators. These models are also used to predict the system's behavior over time, which helps in planning maintenance and repairs [3].

As a result, Markov chains provide an effective tool for analyzing and modeling the reliability of production lines, enabling informed decisions to improve the efficiency and reliability of production processes [10].

RL allows systems to learn through interaction with the environment, receiving rewards for correct actions and penalties for mistakes [11]. The main components of this method are the agent, environment, actions, states, and rewards. The agent makes decisions

(actions) based on its current state in the environment and receives feedback in the form of rewards or penalties, allowing it to learn an optimal strategy.

The conceptual implementation of the RL method in a production line includes the following aspects:

Agent - this is the production line management system that makes decisions regarding its operation. For example, it could be a program that controls the operation of robotic manipulators or conveyor belts.

Environment - this is the production process, which includes all components and operations performed on the production line. This can include both physical processes (movement of parts, assembly) and logistical processes (inventory management, production planning).

Actions - these are specific operations or commands that the agent performs to achieve the goal. For example, changing the speed of the conveyor, adjusting equipment parameters, or initiating additional processes.

States - these are the current conditions or configurations of the production line, such as equipment status, inventory levels, or the number of produced products. Each state provides the agent with information about the current situation on the line.

Rewards - these are metrics that reflect the efficiency of the production line. They can include the amount of produced products, production speed, waste minimization, or downtime reduction.

Modeling a production line using RL allows the agent to optimize processes, increasing the reliability and efficiency of operations. The agent learns through trial and error, receiving feedback in the form of rewards or penalties, and gradually improving its management strategy for production processes.

Task Definition. The research methodology for assessing the reliability of a production line by integrating Markov theory and the RL method consists of several key stages (Fig. 1).

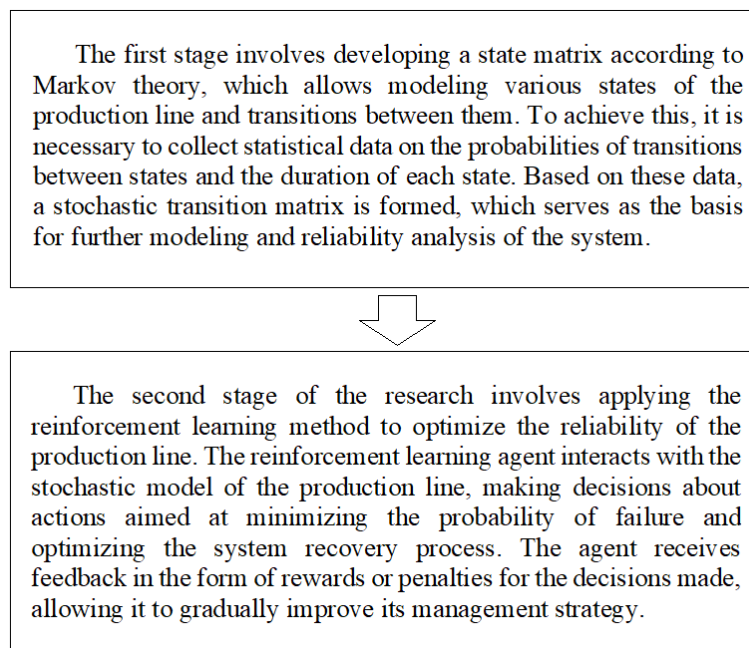


Figure 1 - Diagram of the methodology for assessing the reliability of the production line

Source: developed by the authors

In the course of the research, a model for determining a stochastic matrix has also been proposed, which assumes that the system consists of elements whose states are described by a stochastic distribution. Some elements of the system can be described using the classical approach, which takes into account databases and statistical regularities, while other elements can be described by parameters that correlate with reliability. This allows for more accurate formation of the stochastic matrix and considers all aspects of the production line's reliability.

Presentation of the Main Material. Thus, the methodology of this study includes data collection, development of Markov models, application of RL methods for reliability optimization, and formation of stochastic matrices for comprehensive system analysis. This approach provides a detailed understanding of the production line's functioning and develops recommendations for enhancing its reliability.

To determine the stochastic matrix, a model is proposed that represents the production line as a system consisting of various nodes. Each node of this system can be described in terms of classical reliability concepts, which include the analysis of reliability, durability, maintainability, and storability. For such nodes, a standard approach is used, based on collecting statistical data on failures and calculating reliability indicators from historical data.

Another type of node in this model involves a more modern approach, which includes measuring the operational parameters of nodes that directly correlate with reliability. This allows obtaining up-to-date data on the condition of each node in real-time. Using these data, stochastic state matrices are formed, reflecting the probabilities of transitions between different states of the nodes. This enables more accurate modeling of the production line's behavior and making decisions regarding its reliability optimization.

Thus, the proposed model provides a comprehensive approach to assessing the reliability of the production line, combining classical analysis methods with modern monitoring and data processing techniques. This not only allows predicting possible failures but also actively influencing management and maintenance processes to improve the efficiency and stability of the production line.

One of the approaches considered for finding parameters that correlate with the reliability of system nodes is acoustic spectral analysis, including ultrasonic. This method is a powerful tool for determining parameters that correlate with the reliability of production line nodes. The algorithms of this method include collecting sound data from equipment components using sensors that measure acoustic vibrations. Spectral analysis is performed by transforming the time signal into the frequency domain using mathematical methods such as polynomial regression and discrete Fourier transform [15]. This allows identifying characteristic spectral components that reflect the node's state.

The idea behind determining the state of a node based on its characteristic spectra is that different equipment states have unique acoustic signatures. For instance, a normally functioning bearing generates a specific sound spectrum, while a bearing with defects produces additional harmonics or noises at certain frequencies. Ultrasonic analysis enables the detection of high-frequency components that might be undetectable by traditional acoustic methods. This is particularly useful for diagnosing microscopic cracks, wear, or other initial damages that slightly affect the overall sound signal but are crucial for predicting future failures.

Using acoustic spectral analysis, one can create a model that includes stochastic state matrices of nodes, which reflect the probabilities of transitions between different states based on the obtained acoustic characteristics. Such models allow for the timely identification of potential problems and optimization of maintenance schedules, significantly enhancing the reliability and efficiency of the production line.

To conduct acoustic spectral analysis on production line nodes, it is necessary to integrate appropriate equipment that allows for high-precision measurements of acoustic characteristics. This includes installing sensors and transducers capable of capturing both sound and ultrasonic vibrations. Sensors are typically placed on key components of the production line where mechanical failures or wear are possible. Proper sensor placement is crucial for obtaining the most accurate data.

After collecting acoustic data, spectral analysis is performed using mathematical algorithms. One of the most common methods is the Fourier transform, which converts a time-domain signal into a frequency spectrum:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j(\frac{2\pi}{N}/kn)) \quad (3)$$

where $x(n)$ - is the input signal,

(k) - is the output spectrum,

N - is the number of points in the signal, and

j - is the imaginary unit.

The Fast Fourier Transform is a more efficient implementation that reduces computational complexity. Additionally, approximation methods such as wavelet transforms can be used, allowing the analysis of signals with varying frequency resolutions.

The physical and technical aspects of implementing acoustic spectral analysis include the high sensitivity of sensors to vibrations and noise, as well as their ability to operate under conditions of high temperature and humidity. Ultrasonic sensors have the added advantage of detecting microscopic defects that are not accessible by conventional acoustic methods.

The results of spectral analysis allow the creation of node state models used for predicting failures and optimizing maintenance. This ensures increased reliability and efficiency of production lines.

Acoustic spectral analysis can be conducted at various frequencies, depending on the research purpose and the type of object. Ultrasonic analysis is particularly effective in detecting defects that do not yet affect the overall performance of the equipment but may cause serious problems in the future.

Here is the algorithm for forming a stochastic state matrix of a node based on acoustic spectral analysis is shown in Fig. 2.

This algorithm helps in forming a stochastic matrix that accurately reflects the probabilities of transitions between different states of the node based on acoustic data. The formula for the stochastic transition matrix is shown in (4).

Let $P=\{P_{ij}\}$ be the stochastic matrix, where P_{ij} is the probability of transitioning from state i to state j :

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{j=1}^n N_{ij}} \quad (4)$$

where N_{ij} - is the number of observations of the transition from state i to state j ,
 n - is the total number of states.

In addition to acoustic spectral analysis, there are several other methods that allow measuring parameters correlated with the reliability of production nodes. One such method is temperature field measurement. This method helps detect overheating or uneven temperature distribution in individual equipment nodes, which can indicate wear or malfunctions. Temperature sensors are placed at critical points on the equipment, and the obtained data are analyzed using thermography or other mathematical methods to identify anomalies and their causes.

Video surveillance and motion pattern recognition is another important method. High-resolution cameras are installed at key points of the production line, allowing real-time tracking of node movements. Special image processing algorithms, particularly machine learning methods, are used to recognize motion patterns and detect deviations from normal operating conditions. This enables timely identification of potential failures and decisions regarding their resolution.

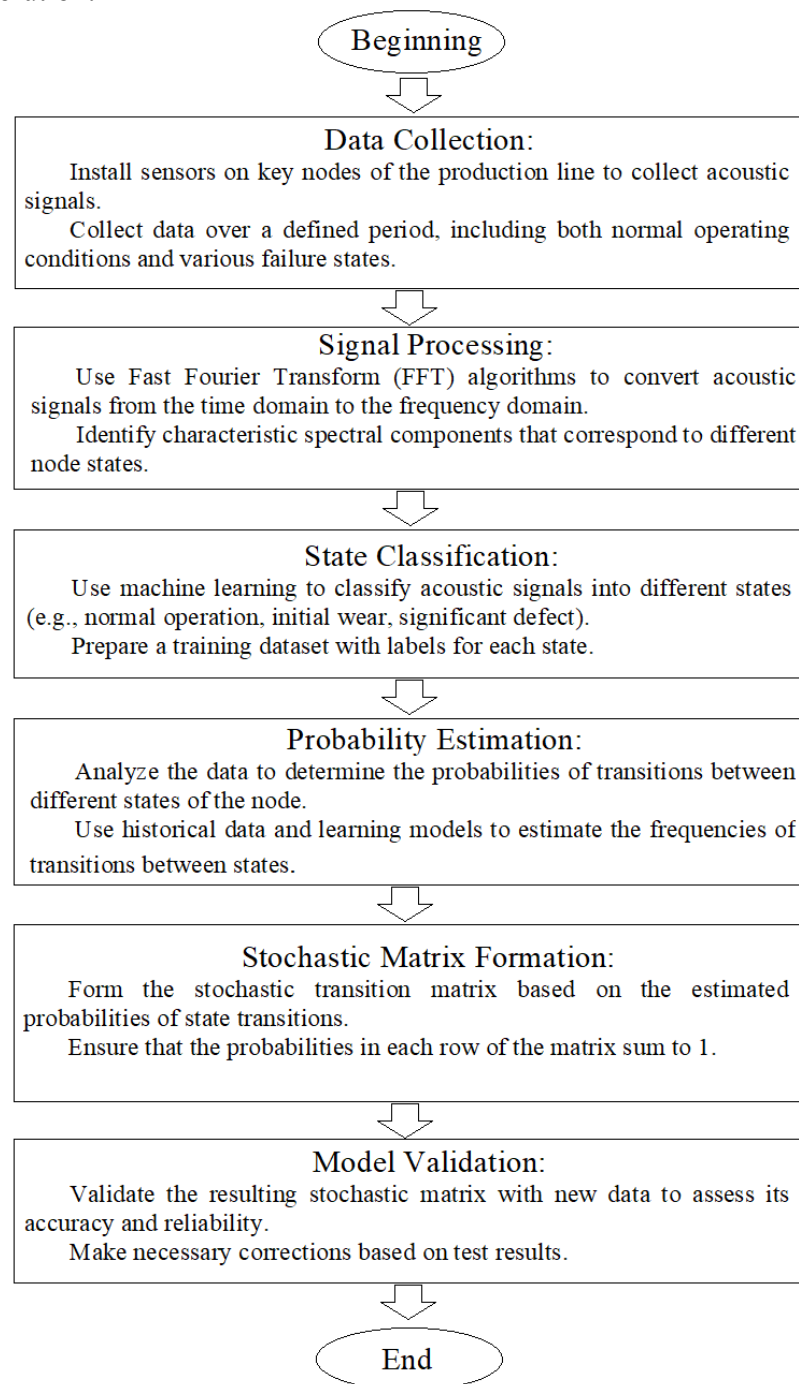


Figure 2 - Diagram of the algorithm for forming a stochastic state matrix

Source: developed by the authors

The method of current dipoles involves measuring the electrical characteristics of the equipment, such as resistance, inductance, and capacitance. These parameters can change

depending on the condition of the nodes, allowing the identification of defects or wear. The application of current dipoles is particularly effective for diagnosing electromechanical systems and identifying potential problems at early stages.

Hardware neural networks, or embedded AI systems, are used to analyze large volumes of data collected from various sensors. These networks can detect complex dependencies and patterns correlated with the equipment's reliability. Thanks to self-learning algorithms, neural networks can continuously improve their predictions and recommendations, enhancing the overall efficiency and stability of the production line.

These methods allow for a comprehensive assessment of the state of production nodes and making informed decisions regarding their maintenance and repair, significantly increasing the reliability of production processes.

Conclusions.

1. A comprehensive approach to assessing and optimizing the reliability of production lines, based on a combination of Markov models and RL methods, has been applied.

2. A model has been developed that represents the production line as a system composed of nodes, each of which can be described using classical methods and stochastic models/

3. It has been shown that the use of Markov chains allows for accurate determination of the probabilities of transitions between the states of nodes, which contributes to a more detailed analysis and prediction of reliability.

4. It has been found that the application of the RL method allows optimizing the operation of production lines through agents' self-learning based on the data obtained about their states and operation. This enables effective responses to changing operating conditions and improves management strategies, thereby enhancing the overall stability and efficiency of the production process.

5. Various methods for measuring parameters correlated with reliability, such as acoustic spectral analysis, temperature field measurement, video surveillance and motion pattern recognition, the method of current dipoles, and the use of hardware neural networks have been proposed. These methods allow creating detailed state models of nodes, ensuring accurate and timely identification of potential failures.

List of References

1. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних систем та виробничих систем / В.Б. Аулін та ін.; за рад. В.Б. Аулін. Кропивницький, 2020. 451с.
2. Neves M., Vieira V., Neto P. A study on a Q-Learning algorithm application to a manufacturing assembly problem. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. № 59, P. 426–440. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.02.014>.
3. Zhao, M., Lu, H., Yang, S., Guo, F. The Experience-Memory Q-Learning Algorithm for Robot Path Planning in Unknown Environment. *IEEE Access* 2020, №8, P.47824–47844. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9022975>
4. Palacio J.C., Jiménez Y.M., Schietgat, L., Van Doninck B., Nowé, A. A. Q-Learning algorithm for flexible job shop scheduling in a real-world manufacturing scenario. *Procedia CIRP*. 2022, №106, P 227–232. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.183>
5. Ha D. Reinforcement learning for improving agent design. *Artificial life*. 2019. Vol. 25, No. 4. P. 352–365. URL: https://doi.org/10.1162/artl_a_00301.
6. Han R., Chen K., Tan C. Curiosity-driven recommendation strategy for adaptive learning via deep reinforcement learning. *British journal of mathematical and statistical psychology*. 2020. Vol. 73, No. 3. P. 522–540. URL: <https://doi.org/10.1111/bmsp.12199>.
7. Sun S. et al. A Inverse reinforcement learning-based time-dependent A* planner for human-aware robot navigation with local. *Advanced robotics*. 2020. Vol. 34, No. 13. P. 888–901. URL: <https://doi.org/10.1080/01691864.2020.1753569>.
8. L.A.P., Fu M.C. Risk-Sensitive reinforcement learning via policy gradient search. *Foundations and trends® in machine learning*. 2022. Vol. 15, No. 5. P. 537–693. URL: <https://doi.org/10.1561/22000000091>.
9. He S. Reinforcement learning and adaptive optimization of a class of Markov jump systems with completely unknown dynamic information. *Neural computing and applications*. 2019. Vol. 32, No. 18. P. 14311–14320. URL: <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04180-2>.

10. Moore B. L. and others. Reinforcement learning. *Anesthesia & analgesia*. 2011. Vol. 112, No. 2. P. 360–367. URL: <https://doi.org/10.1213/ane.0b013e31820334a7>.
11. Yan Y. et al Reinforcement learning for logistics and supply chain management: methodologies, state of the art, and future opportunities . *Transportation research part E: logistics and transportation review*. 2022. Vol. 162. P. 102712. URL: [https://doi.org/10.1016/j.tre.\(2022\)](https://doi.org/10.1016/j.tre.(2022)).
12. Wu Y. et al. Dynamic handoff policy for RAN slicing by exploiting deep reinforcement learning . *EURASIP journal on wireless communications and networking*. 2021. Vol. 2021, No. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01939-x>.
13. Jesus J. C. et al. Deep deterministic policy gradient for navigation of mobile robots in simulated environments. *2019 19th international conference on advanced robotics (ICAR)*, December 2–6. 2019, Belo Horizonte, Brazil. P. 349 – 361. URL: <https://doi.org/10.1109/icar46387.2019.8981638>
14. Hu H, Yang M, Yuan Q, You M., Shi X, Sun Y Sensors Direct Position Determination of Non-Gaussian Sources for Multiple Nested Arrays. *Discrete Fourier Transform and Taylor Compensation Algorithm*. 2024, Vol. 24. №12. 3801. <https://doi.org/10.3390/s24123801>.
15. Аулін В.В., Ковальов С.Г., Гриньків А.В., Варваров В.В. Підвищення надійності та ефективності виробничих ліній з використанням методів штучного інтелекту з моніторингом акустичних сигналів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: Збірник наукових праць - Кропивницький: ЦУНТУ*. 2024. Вип.10(41). Ч. 2. - Стор. 142-151. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.142-151](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.142-151)
16. Аулін В.В., Ковальов С.Г., Гриньків А.В., Варваров В.В. Алгоритм для оптимізації надійності та ефективності виробничого обладнання з використанням методів штучного інтелекту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький: ЦУНТУ*, 2024. Вип. 10(41). Ч. 1. С. 60-67. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.60-67](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.60-67)
17. Ковальов, С.Г. Оптимізація виробничого часу з використанням навчання з підкріпленням як окремих випадок підвищення ефективності автоматизованих виробничих ліній. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: Збірник наукових праць – Кропивницький: ЦУНТУ*, 2025. Вип. 11(42). Ч. 1. С. 198-205. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.198-205](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.198-205)
18. Ковальов С.Г., Ковальов Ю.Г. Особливості реалізації моделей штучних нейронних мереж з використанням апаратних рішень. *"Наука і технології сьогодні"*. 2024. №6(34), С. 1131. URL: DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34))

References

1. Aulin V.V. (2020). Methodological foundations of design and operation of intelligent transport systems and production systems. *Kropyvnytskyi*, [in Ukrainian].
2. Neves M., Vieira V., Neto P. (2021) A study on a Q-Learning algorithm application to a manufacturing assembly problem. *Journal of Manufacturing Systems*.. No. 59. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.02.014>.
3. Zhao, M., Lu, H., Yang, S., Guo, F. (2020) The Experience-Memory Q-Learning Algorithm for Robot Path Planning in Unknown Environment. *IEEE Access* No. 8. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9022975>
4. Palacio J.C., Jiménez Y.M., Schietgat, L., Van Doninck B., Nowé, A. A. (2022) Q-Learning algorithm for flexible job shop scheduling in a real-world manufacturing scenario. *Procedia CIRP*.No. 106, P 227–232. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.183>.
5. Ha D. Reinforcement learning for improving agent design. (2019). *Artificial life*. Vol. 25, No. 4. P. 352–365. URL: https://doi.org/10.1162/artl_a_00301.
6. Han R., Chen K., Tan C. (2020). Curiosity-driven recommendation strategy for adaptive learning via deep reinforcement learning. *British journal of mathematical and statistical psychology*. Vol. 73, No. 3. P. 522–540. URL: <https://doi.org/10.1111/bmsp.12199>.
7. Sun S. et al. (2020). A Inverse reinforcement learning-based time-dependent A* planner for human-aware robot navigation with local. *Advanced robotics*. Vol. 34, No. 13. P. 888–901. URL: <https://doi.org/10.1080/01691864.2020.1753569>.
8. L.A.P., Fu M.C. (2022) Risk-Sensitive reinforcement learning via policy gradient search. *Foundations and trends® in machine learning*. Vol. 15, No. 5. P. 537–693. URL: <https://doi.org/10.1561/22000000091>.
9. He S. (2019) Reinforcement learning and adaptive optimization of a class of Markov jump systems with completely unknown dynamic information. *Neural computing and applications*.. Vol. 32, No. 18. P. 14311–14320. URL: <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04180-2>.
10. Moore B.L. and others. (2011) Reinforcement learning. *Anesthesia & analgesia*. Vol. 112, No. 2. P. 360–367. URL: <https://doi.org/10.1213/ane.0b013e31820334a7>.
11. Yan Y. et al. (2022) Reinforcement learning for logistics and supply chain management: methodologies, state of the art, and future opportunities. *Transportation research part E: logistics and transportation review*. Vol. 162. P. 102712. URL: [https://doi.org/10.1016/j.tre.\(2022\)](https://doi.org/10.1016/j.tre.(2022)).
12. Wu Y. et al. (2021) Dynamic handoff policy for RAN slicing by exploiting deep reinforcement learning. *EURASIP journal on wireless communications and networking*. Vol. 2021, No. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01939-x>.

13. Jesus J.C. et al. (2019) Deep deterministic policy gradient for navigation of mobile robots in simulated environments. 2019 19th international conference on advanced robotics (ICAR), P. 349 – 361. URL: <https://doi.org/10.1109/icar46387.2019.8981638>.
14. Hu H, Yang M, Yuan Q, You M., Shi X, Sun Y. (2024). Sensors Direct Position Determination of Non-Gaussian Sources for Multiple Nested Arrays. Discrete Fourier Transform and Taylor Compensation Algorithm. Vol. 24. #12. 3801. <https://doi.org/10.3390/s24123801>.
15. Aulin V.V., Kovalov S.G., Hrynkiv A.V., Varvarov V.V. (2024). Increasing the reliability and efficiency of production lines using artificial intelligence methods with monitoring of acoustic signals. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: Collection of Scientific Works*. Kropyvnytskyi: TsUNTU 10(41). [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.142-151](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.142-151) [in Ukrainian].
16. Aulin V.V., Kovalov S.G., Hrynkiv A.V., Varvarov V.V. (2024) Algorithm for optimizing the reliability and efficiency of production equipment using artificial intelligence methods. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. Kropyvnytskyi: TsUNTU. 10(41). [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.60-67](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.60-67) [in Ukrainian].
17. Kovalov, S.G. (2025.) Optimization of production time using reinforcement learning as a special case of increasing the efficiency of automated production lines. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: Collection of Scientific Works*. Kropyvnytskyi: TsUNTU 11(42). [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.198-205](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.198-205) [in Ukrainian].
18. Kovalov S.G., Kovalov Y.G. (2024). Features of the implementation of artificial neural network models using hardware solutions. "Science and Technology Today". No. 6(34). [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34)) [in Ukrainian].

С. Г. Ковальов¹, канд. пед. наук, В. В. Аулін¹, проф., д-р техн. наук, А. В. Гриньків¹, канд. техн. наук, Ю. Г. Ковальов², канд. техн. наук

¹Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

²Українська державна льотна академія, м. Кропивницький, Україна

Моделювання стохастичної матриці станів виробничої лінії для оптимізації її експлуатаційної надійності за допомогою навчання з підкріпленням

Основною метою розробки моделі визначення стану виробничої лінії було створення універсального інструменту, здатного аналізувати та оптимізувати будь-яку промислову виробничу лінію. Модель розроблена для ефективної оцінки робочих станів виробничого обладнання, прогнозування потенційних збоїв та рекомендацій щодо коригувальних дій для підвищення надійності та ефективності. Завдяки використанню математичних методів та методів на основі штучного інтелекту, підхід забезпечує адаптивність до різних типів виробничих систем, що робить його застосовним у різних галузях промисловості.

Модель використовує ланцюги Маркова для точного представлення послідовності виробничих станів, включаючи ймовірнісний характер переходів між операційними фазами. На відміну від традиційних детерміністичних моделей, запропонований підхід враховує реальні невизначеності, властиві виробничим процесам, що дозволяє точніше прогнозувати поведінку системи. Інтеграція стохастичного аналізу розширює можливості моделювання складних робочих процесів, покращуючи прийняття рішень та оцінку ризиків у промисловому середовищі.

Метод формування матриці стохастичних станів забезпечує комплексну систему оптимізації для виробничих систем, використовуючи сучасну аналітику даних на основі штучного інтелекту. Цей підхід надає виробникам інструмент для покращення часу безвідмовної роботи, скорочення простоїв та більш ефективного розподілу ресурсів. Адаптивність моделі в режимі реального часу гарантує, що промислові системи залишаються чутливими до динамічних умов, оптимізуючи продуктивність та мінімізуючи перебої.

Модель успішно оцінює ймовірності переходу на основі як історичних баз даних, так і даних датчиків у реальному часі, що дозволяє їй адаптуватися до широкого спектру типів обладнання та умов експлуатації. Ця адаптивність підвищує точність прогнозування потенційних збоїв та оптимізації виробничих робочих процесів. Крім того, методи навчання з підкріпленням допомагають покращити продуктивність системи шляхом постійного вдосконалення операційних стратегій, зниження ризиків та підтримки безперебійної роботи навіть за змінних виробничих сценаріїв.

Завдяки інтеграції ланцюгів Маркова та аналітики на основі даних, запропонований підхід дозволяє ранньо виявляти потенційну неефективність та систематичні збої. Він допомагає виробникам прогнозувати критичні інциденти та оптимізувати процеси прийняття рішень, що призводить до підвищення продуктивності, зниження витрат на обслуговування та підвищення надійності на виробничих лініях. Зрештою, модель сприяє розробці високостійких промислових систем, забезпечуючи стабільну роботу та ефективність за різних умов експлуатації.

виробнича лінія, штучний інтелект, автоматизація виробництва, ланцюги Маркова, стохастична матриця

Одержано (Received) 13.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 15.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

UDC 004.057.4

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.204-213](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.204-213)

Volodymyr Smirnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Nataliia Smirnova, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
e-mail: swckntu@gmail.com

Easy Net Everywhere Wireless Network Transport Protocol Stack

A description of the developed Easy Net Everywhere wireless network transport protocol stack is presented. The structure of protocols that implement data delivery to the destination node is described. The application conditions of each protocol are described, depending on the network configuration. The protocol stack is divided into groups. The first group includes protocols for exchanging data between nodes in the same network with a unique or group password. The second group includes protocols for data exchange between nodes of different networks with a unique password. The third group includes protocols for data exchange using packet routing. Each protocol has its own identifier. According to the identifier, the network node selects a protocol for transmitting data on the transmitter side and a protocol for receiving data on the receiver side. The network architectures for which the transport protocol stack was created are presented.

protocol, protocol identifier, wireless network, easy net everywhere, network node

Problem statement. The development of wireless systems for controlling remote and spatially distributed objects is currently topical.

Such systems must meet the requirements of reliability, resistance to interference, stealthy operation, and have a high detection threshold. Additional requirements: high bitrate and ease of use of the transport protocol stack.

Several well-known wireless networks such as Z-Wave, ZigBee, LoRaWAN are now established. These networks are capable of solving a certain range of problems subject to a number of limitations. These are limitations such as UART communication port speed (baudrate), number of channels, radio data rate (bitrate) and maximum distance of stable data exchange between network nodes.

It has been found that, based on a combination of characteristics, these wireless networks have limitations that make it difficult to perform some tasks.

To solve the task of control remote objects and collecting data from remote objects, the authors created a wireless network Easy Net Everywhere.

However, the transport protocols of the above wireless networks cannot be used in the Easy Net Everywhere network for various reasons.

Therefore, it is necessary to create a proprietary transport protocol stack through which the exchange of commands and data between network nodes can be realised.

Analysis of research and publications. In the process of implementation of the research topic "Creation a 2.4 GHz mobile network with adaptive amorphous topology for controlling a swarm of UAVs and robotic objects", registration no. 0120U104088. The authors analysed the characteristics of Wi-Fi, Z-Wave, WiMAX, ZigBee, LoRaWAN wireless networks.

Open access documents that present wireless technologies, wireless networks and standards for network protocols were analysed. Wi-Fi networking technology is described by the IEEE 802.11 standard [1, 2]. The protocol stack cannot be used in an Easy Net Everywhere network. The limitation for application is the long connection establishment time (up to 10 seconds).

ZigBee technology is described by the IEEE 802.15.4 standard for wireless networks with routing [3-6]. ZigBee technology allows you to build topologies, star or peer-to-peer

(P2P) topologies. If the network topology changes dynamically, the network cannot operate stably. This is a limitation for building networks with variable topology. Therefore, the protocol stack of this standard cannot be used in an Easy Net Everywhere network.

The Z-Wave network is described in the document ITU-T G.9959 [7-8]. Networking is a good solution for controlling objects over a short distance. However, to create network controllers, you must be a member of the Z-Wave Alliance and be certified.

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) technology is described by the standard IEEE 802.16. The standard describes time-sharing multiple access technology (TDMA) [9-10]. The technology requires the use of base stations, subscriber stations and other network equipment. The network technology is not compatible with Easy Net Everywhere.

LoRaWAN technology, has both advantages and disadvantages [11-13]. Advantages include a radio transmission distance of up to 10 km in open terrain. Disadvantages: data transmission delay can reach several tens of seconds and low bandwidth of 0.3-50 Kbps.

It is found that none of the transport protocol stacks of the considered wireless technologies and networks can be used in the Easy Net Everywhere network.

The publications [14-16] present the implementation of the Easy Net Everywhere network architecture and the main differences from the considered technologies. One of the differences is the bandwidth of network nodes up to 2 Mbps.

Task statement. For interaction of a network application developer with Easy Net Everywhere network nodes at the software interface level, the development of a transport layer protocol stack is required.

Protocols should consider inter-network communication, group and unique password access to network nodes. One of the protocols should realise text messaging between network nodes using a smartphone.

The protocol API shall provide serialisation and deserialisation of the protocol header and data to transmit and receive data using the UART port.

The length of the protocol header should be the minimum possible.

The development results presentation. An Easy Net Everywhere network is a fully connected network in which each node on the network can communicate with any other node on the network. All nodes in the network are equivalent by default (Fig.1).

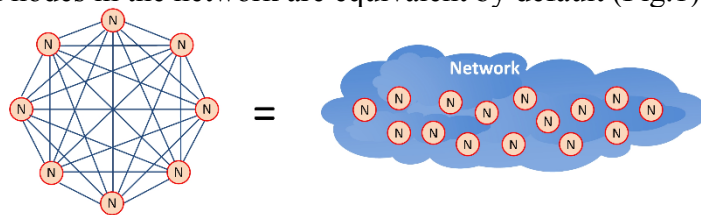


Figure 1 - Full mesh network architecture

Source: developed by the authors.

The Easy Net Everywhere network architecture allows the user to select a network model and, based on the selected model, create a network optimised for a particular task. Easy Net Everywhere implements the following models:

- the “LIGHT” model;
- the “PRO” model;
- the “ENTERPRISE” model.

For example, to build a Smart Home system that contains a small number of nodes in a small area in a low traffic environment, the use of routers is inappropriate. Therefore, the “LIGHT” network model would be the best choice for such a system. However, in a network

with many nodes and distances between nodes of more than 10 km, the use of routers is a necessity. In this case, the "PRO" network model should be used.

To build a system in which it is necessary to unite nodes into separate networks on territorial or functional grounds, it is necessary to use the "ENTERPRISE" network model.

The "LIGHT" network model uses the full mesh network mode without routing (Fig.2).

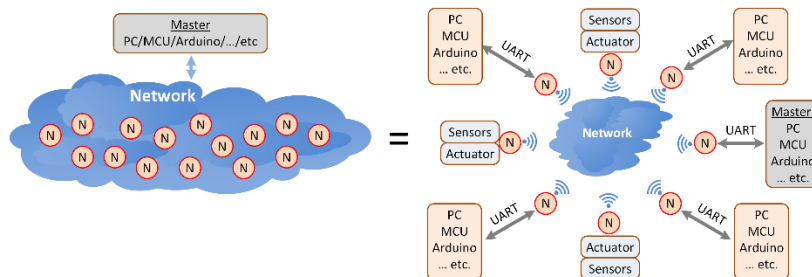


Figure 2 - Easy Net Everywhere network architecture based on the "LIGHT" model

Source: developed by the authors.

The LIGHT network consists of the following components: Net Node, Net Controller and a network master, which can be a PC or any microcontroller.

This model is recommended for creating small local networks with low traffic.

The "PRO" network model uses the network operation mode with routing and relatively high traffic in the presence of obstacles for the passage of network packets (Fig. 3). The "PRO" network includes the following components:

- "Net Node", "Net Controller" network nodes;
- "Router/Fast Router" routers;
- network master, which can be a PC or any microcontroller.

The use of routers allows the user to assign and modify packet routes, distribute network traffic, and bypass physical objects that are obstacles to packets (buildings, trees, etc.).

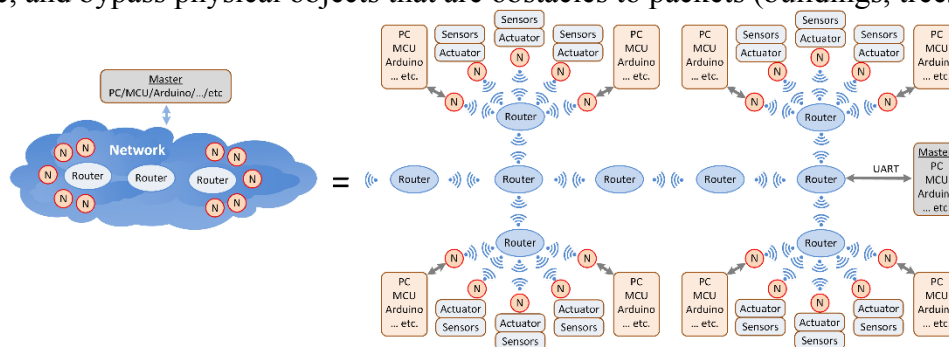


Figure 3 - Easy Net Everywhere network architecture based on the "PRO" model

Source: developed by the authors.

The "ENTERPRISE" network model uses a multi-network mode of operation using routers and bridges to create networks with relatively high traffic (Fig. 4).

The result of research, design and testing is the implementation of a transport protocol stack for data exchange between Easy Net Everywhere network nodes. Each protocol performs a single transaction during a communication session, the size regardless of the data being transferred.

A datagram transmitted over a network consists of a protocol header and a data field. The protocol header defines the method of data delivery to the recipient according to the delivery conditions:

- sharing data on the same network;
- inter-network data exchange;
- network nodes or groups of network nodes have a common login and password;
- network nodes have a unique password;
- data exchange using routing.

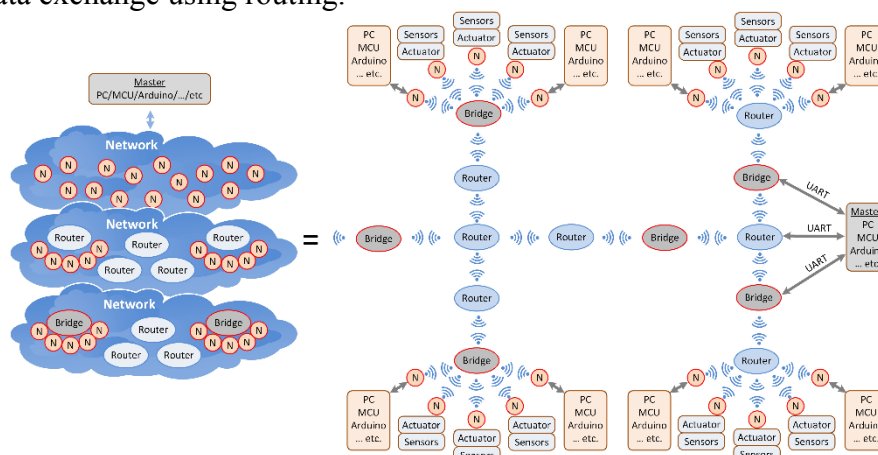


Figure 4 - Easy Net Everywhere network architecture based on the "ENTERPRISE" model

Source: developed by the authors.

Each protocol has its own identifier, the value of which placed in the *Protocol ID* field. The value of the protocol identifier is assigned by the API function.

The *Routers_Num* field is computable. It stores the number of routers on the datagram transmission route. The value of the field is assigned by the API function.

The structure of the Data field is determined by the value of the *Data Format ID* field and is filled in by the user. Up to 200 data structure formats can be used by the user.

The use of protocols is realised by the following algorithm:

- router list assignment;
- assignment the login and password of the destination node;
- data structure assignment;
- assignment of the network address and node address fields;

1. call of the `data_send()` function with passing of parameter arguments. The authors have developed the following transport protocols:

Simple text messaging protocol

Conditions of use:

- text messaging using a smartphone and "Serial Bluetooth Terminal" or similar programme.
- exchanging text messages and using the UART serial port.
- the sender node and the destination node are in the same network;
- the sender node and the destination node have a common login and password;
- the address of the destination node has already been set by the AT command `AT+TARG address`.

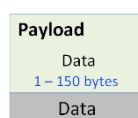


Figure 5 - Simple text messaging protocol

Source: developed by the authors.

Protocol fields:

Data - data to be transmitted.

Application example:

Hello, world!

Addressable text messaging protocol

Conditions of use:

- text messaging using a smartphone and "Serial Bluetooth Terminal" or similar programme.
- exchanging text messages and using the UART serial port.
- the sender node and the destination node are in the same network;
- the sender node and the destination node share a common login and password.

Protocol Header	Payload
Target Address 1 byte	Data 1 – 150 bytes
1-223	Data

Figure 6 - Addressable text messaging protocol

Source: developed by the authors.

Protocol fields:

Target address - destination node address in the format *addr*.

Data - data to be transmitted.

Application example: *123*Hello, world! or: *123* Hello, world!

Further data exchange with this node can be done by sending a data packet without specifying the node address.

All other protocols exchange data on the network using the UART serial port.

A protocol for exchanging data on the same network without routing.ID: 0xF0

Conditions of use:

- the sender node and the destination node are in the same network;
- the sender node and the destination node have a common login and password;
- routing is not used.

Protocol Header		Payload	
Protocol ID 1 byte	Target Address 1 byte	Data Format ID 1 byte	Data 1 – 150 bytes
0xF0	1-254	1-200	Data

Figure 7 - Protocol for exchanging data on the same network without routing. ID: 0xF0

Source: developed by the authors.

Protocol fields:

Protocol ID - protocol identifier;

Target address - destination node address ;

Data Format ID - the first byte in the data structure (ID) defines its format;

Data - data to be transmitted.

API prototype protocol function:

```
void data_send(
    int8 target_addr,
    char* data_buffer
);
```

Protocol for data exchange in the same network with routing. ID: 0xF1

Conditions of use: the sender node and the destination node are in the same network; the sender node and the destination node have a common login and password; routing is used.

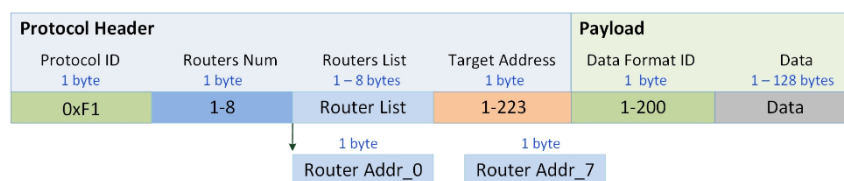


Figure 8 - Protocol for exchanging data on the same network with routing. ID: 0xF1

Source: developed by the authors.

Protocol fields:

- Protocol ID - protocol identifier;
- Routers_Num - number of routers in the list;
- Router_List - list of router addresses for routing packets;
- Target address - destination node address ;
- Data Format ID - the first byte in the data structure (ID) defines its format;
- Data - data to be transmitted.

API prototype protocol function:

```
void data_send(
    char* router_addr_list,
    int8 target_addr,
    char* data_buffer
);
```

A protocol for exchanging data on the same network without routing. ID: 0xF2

Conditions of use:

- the sender node and the destination node are in the same network;
- the sender node and the destination node have different login and password;
- routing is not used.



Figure 9 - Protocol for exchanging data on the same network without routing. ID: 0xF2

Source: developed by the authors.

Protocol fields:

- Protocol ID - protocol identifier;
- Target address - destination node address;
- Target Login - destination host login;
- Target Password - destination host password;
- Data Format ID - the first byte in the data structure (ID) defines its format;
- Data - data to be transmitted.

API prototype protocol function:

```
void data_send(
    int8 target_addr,
    char* target_login,
    char* target_password,
    char* data_buffer
);
```

```
);
```

Protocol for data exchange in the same network with routing. ID: 0xF3

Conditions of use:

- the sender node and the destination node are in the same network;
- the sender node and the destination node have different login and password;
- routing is used.



Figure 10 - Protocol for exchanging data on the same network with routing. ID: 0xF3

Source: developed by the authors.

Protocol fields:

Protocol ID - protocol identifier;

Routers_Num - number of routers in the list;

Router_List - list of router addresses for routing packets;

Target address - destination node address ;

Target Login - destination host login;

Target Password - destination host password;

Data Format ID - the first byte in the data structure (ID) defines its format;

Data - data to be transmitted.

API prototype protocol function:

```
void data_send(
    char* router_addr_list,
    int8 target_addr,
    char* target_login,
    char* target_password,
    char* data_buffer
);
```

Protocol for data exchange in different networks without routing. ID: 0xF4

Conditions of use:

- the sender node and the destination node are on different networks;
- the sender node and the destination node have different login and password;
- routing is not used.



Figure 11 - Protocol for data exchange in different networks without routing. ID: 0xF4

Source: developed by the authors.

Protocol fields:

Protocol ID - protocol identifier;

Network Address - destination node network address;

Target address - destination node address ;

Target Login - destination host login;

Target Password - destination host password;

Data Format ID - the first byte in the data structure (ID) defines its format;

Data - data to be transmitted.

API prototype protocol function:

```
void data_send(
    int8 net_addr,
    int8 target_addr,
    char* target_login,
    char* target_password,
    char* data_buffer
);
```

Protocol for data exchange in different networks with routing. ID: 0xF5

Conditions of use:

- the sender node and the destination node are on different networks;
- the sender node and the destination node have different login and password;
- routing is used.

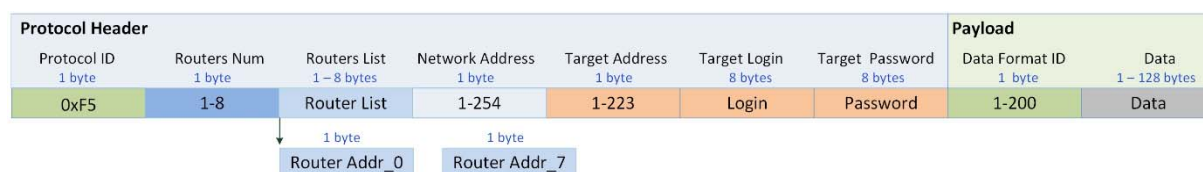


Figure 12 - Protocol for data exchange in different networks with routing. ID: 0xF5

Source: developed by the authors.

Protocol fields:

- Protocol ID - protocol identifier;
- Routers_Num - number of routers in the list;
- Router_List - list of router addresses for routing packets;
- Network Address - destination node network address;
- Target address - destination node address;
- Target Login - destination host login;
- Target Password - destination host password;
- Data Format ID - the first byte in the data structure (ID) defines its format;
- Data - data to be transmitted.

API prototype protocol function:

```
void data_send(
    char* router_addr_list,
    int8 net_addr,
    int8 target_addr,
    char* target_login,
    char* target_password,
    char* data_buffer
);
```

The creation of the protocol stack was carried out within the framework of the research topic «Creation a 2.4 GHz mobile network with adaptive amorphous topology for controlling a swarm of UAVs and robotic objects», registration no. 0120U104088.

Testing of the operation of the protocols created was carried out.

Data exchange between the network nodes was carried out at a distance of 10 km with a bitrate of 250 Kbps. Test packet transmission period - 20 ms without routing and 250 ms with routing.

There were no failures or packet losses during the testing process.

Conclusions. The authors have created a transport protocol stack for Easy Net Everywhere wireless networking. The protocols implement: data exchange in one network

with unique and group password; inter-network data exchange with unique and group password; data exchange using routing.

The size of the service information in the protocol header is limited to the minimum required fields:

Protocol ID_0xF0 - 2 bytes, data field length -150 bytes.

Protocol ID_0xF5 - 28 bytes, data field length -128 bytes.

Test results showed the effectiveness of the developed protocols for data transmission in the network.

The problem of missing transport protocol stack in Easy Net Everywhere network has been solved successfully.

List of References

1. Brian Verenkoff Understanding and Optimizing 802.11n. Buffalo Technology. July 2011. 8 p. URL: https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf (reference date : 12.03.2023).
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6. URL: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> (reference date : 12.01.2025).
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (reference date : 12.01.2025).
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2003.06.12. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html (reference date : 12.03.2023).
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (reference date : 12.01.2025).
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. Jan. 2020. URL: <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> (reference date : 12.01.2025).
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices. Vesternet Ltd. 28.01.2020. URL: <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> (reference date : 12.03.2023).
8. Recommendation G.9959. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> (reference date : 12.03.2023).
9. WiMAX Forum. URL: <http://wimaxforum.org> (reference date : 12.03.2023).
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. 29 May 2009. URL: <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> (reference date : 12.03.2023).
11. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January.
12. LoRaWAN Regional Parameters, RU 864-869MHz ISM Band.
13. SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver, Datasheet, 2015 Semtech Corporation.
14. Смірнов В.В., Смірнова Н.В., Пархоменко Ю.М. Бездротова локальна мережа класу Smart Home на базі модулів сплітерів-репітерів. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Кропивницький: ЦНТУ, 2021. Вип. 51. С. 195-202. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.195-202>.
15. Смірнов В.В., Смірнова Н.В. Мобільна mesh-мережа для управління роєм об'єктів. Центральнотрапінський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 7(38), ч. II. С. 3-11. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.3-11](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.3-11).
16. Смірнов В.В., Смірнова Н.В. Практична реалізація безпроводної мережі «Easy Net Everywhere». М 58 International security studios: managerial, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects. International collective monograph. Volume I. NMBU, Research and Education. 2024. 700 p. Oslo, Kingdom of Norway - 2024. С.665 - 697. DOI 10.5281/zenodo.10822120

References

1. Brian Verenkoff. (July 2011). Understanding and Optimizing 802.11n. Buffalo Technology : website. *lmi.net*. Retrieved from https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf [in English].
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6 (n.d.) : website. *wi-fi.org*. Retrieved from <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> [in English].
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].

4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks (2003.06.12). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. [standards.ieee.org](https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html). Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html [in English].
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee: C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. [standards.ieee.org](https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html). Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques (Jan. 2020) : website. libris.kb.se. Retrieved from <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60kttf> [in English].
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices (28.01.2020). *Vesternet Ltd.* : website. vesternet.com. Retrieved from <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> [in English].
8. Recommendation G.9959 (n.d.) : website. [itu.int](http://www.itu.int). Retrieved from <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> [in English].
9. WiMAX Forum (n.d.) : website. wimaxforum.org. Retrieved from <http://wimaxforum.org> [in English].
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. 29 May 2009. URL: <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> (reference date : 12.03.2023).
11. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January.
12. LoRaWAN Regional Parameters, RU 864-869MHz ISM Band.
13. SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver, Datasheet, 2015 Semtech Corporation.
14. Smirnov V.V., Smirnova N.V., Parkhomenko YU.M. Bezdrotova lokal'na merezha klasu Smart Home na bazi moduliv spliteriv-repiteriv. Zahal'noderzhavnyy mizhvidomchy nauko-tekhnichnyy zbirnyk Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya sil'skohospodars'kykh mashyn. Kropyvnyts'kyi: TSNTU, 2021. Vyp. 51. S. 195-202 (Fakhove vydannya). DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.195-202>.
15. Smirnov V.V., Smirnova N.V. Mobil'na mesh-merezha dlya upravlinnya royem ob'yektiv. Tsentral'noukrayins'ky naukovy visnyk. Tekhnichni nauky. 2023. Vyp. 7(38), ch.II. S. 3-11 (Fakhove vydannya). DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.3-11](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.3-11).
16. Smirnov V.V., Smirnova N.V. Praktychna realizatsiya bezprovidnoyi merezhi «Easy Net Everywhere». M 58 International security studios: managerial, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects. International collective monograph. Volume I. NMBU, Research and Education. 2024. - 700 p. Oslo, Kingdom of Norway - 2024. S.665 - 697. DOI 10.5281/zenodo.10822120

В. В. Смірнов, доц., канд. техн. наук, **Н. В. Смірнова**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Стек транспортних протоколів бездротової мережі Easy Net Everywhere

Метою статті є презентація розробленого та реалізованого стека транспортних протоколів бездротової мережі Easy Net Everywhere. Авторами в рамках науково-дослідної теми «Створення мобільної мережі 2.4 GHz з адаптивною аморфною топологією для управління роєм БПЛА і робототехнічних об'єктів», реєстраційний № 0120U104088, було проведено аналіз наявних бездротових мереж на предмет можливості використання транспортних протоколів цих мереж у мережі Easy Net Everywhere. Аналіз засвідчив, що для розв'язання задачі керування віддаленими і мобільними в просторі об'єктами необхідне розроблення пропрієтарних компактних транспортних протоколів.

Показано архітектуру бездротової мережі, для яких створено транспортні протоколи, такі, як протоколи простого та адресного обміну текстовими повідомленнями, протоколи обміну даними в одній мережі без маршрутизації та з маршрутизацією, протоколи обміну даними в різних мережах без маршрутизації та з маршрутизацією. Описано структуру протоколів, які реалізують доставку даних вузлу-одержувачу. Описано умови застосування кожного протоколу залежно від конфігурації мережі. Стек протоколів розділено на групи. До першої групи належать протоколи обміну даними між вузлами однієї мережі з унікальним або груповим паролем. До другої групи належать протоколи обміну даними між вузлами різних мереж з унікальним паролем. До третьої групи належать протоколи обміну даними з використанням маршрутизації пакетів. Кожен протокол має свій ідентифікатор. Відповідно до ідентифікатора вузол мережі обирає протокол для передавання даних на стороні передавача і протокол для приймання даних на стороні приймача. Результати тестів показали ефективність розроблених протоколів під час передавання даних у мережі.

Таким чином, розв'язано завдання розроблення стека транспортних протоколів для мережі Easy Net Everywhere. За допомогою цих протоколів стає можливим керування віддаленими, розподіленими і мобільними в просторі об'єктами та отримання даних телеметрії з цих об'єктів.

протокол, ідентифікатор протоколу, бездротова мережа, easy net everywhere, вузол мережі

Одержано (Received) 31.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 03.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.21

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.214-223](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.214-223)

О. О. Давиденко¹, доц., канд. техн. наук, М. В. Гаркуша¹, доц., канд. техн. наук,
І. А. Козарчук¹, доц., канд. техн. наук, П. О. Казак¹, Я. О. Цапок²

¹Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

²Фізична особа підприємця, м. Київ, Україна

e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua

Методи визначення технічного стану водопропускної труби з аналізом необхідних ремонтних робіт

Погіршення технічного стану водопропускних труб є нагальною проблемою експлуатаційного утримання автодорожніх та залізничних шляхів. Актуальним питанням є сучасні методи та підходи з визначення технічного стану споруд та виконання ремонтних заходів із застосуванням ефективних ремонтних матеріалів для відновлення проєктних експлуатаційних властивостей споруди. В роботі розглянуто методи визначення технічного стану водопропускної труби та надано аналіз рекомендацій з необхідних ремонтних заходів.

водопропускна труба, дефекти, ремонт, технічний стан

Постановка проблеми. Водопропускна труба розміщена під залізничною колією Хмельницькій області, Кам'янець-Подільський район. Водопропускна труба є унікальною спорудою, яка має не лише фізичне значення для регіону, а й історичною культурною спадщиною, яка побудована в 1912-1914 рр. з каменю. Подібних споруд в Україні знаходиться надзвичайно мало.

Метою обстеження водопропускної труби під залізничною колією є визначення технічного стану із складанням відомості дефектів та пошкоджень, оцінка залишкового ресурсу, а також надання пропозицій щодо необхідних ремонтних заходів.

Визначення технічного стану водопропускної труби є важливим завданням для аналізу та подальшого вибору ефективних методів ремонту, щодо збереження унікальності споруди та забезпечення прийнятної надійності та довговічності, конструкції окремо та всього залізничного шляху в цілому, є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стан транспортних споруд в Україні та світі, має погіршений стан, що зумовлено умовами експлуатації та особливостями будівництва та утримання споруд, спостерігається знос матеріалів конструкцій споруд, збільшення кількості та характеристик навантажень, зміна кліматичних умов в яких експлуатуються споруди, тощо [1-5].

Транспортні споруди мають ключове стратегічне значення, що потребує застосування сучасних будівельних матеріалів та технологій з умовно низькою вартістю під час їх будівництва, ремонту та експлуатації [2, 5].

Світові дослідження акцентують увагу на несній здатності споруд; методик проєктування з особливістю втомних характеристик, втрати довговічності споруд, а також застосування відходів промисловості та перероблених матеріалів, тощо [6].

Перспективними дослідженнями в Україні, Європі та США є підходи зі створення сучасних захисних систем від корозії, підвищення характеристик металу, удосконалення монтажних систем та підходів, удосконалення системи моніторингу стану споруди.

На сьогоднішній день, актуальним залишається питання, щодо впровадження в Україні європейських підходів будівництва, ремонту та утримання споруд, адаптації їхніх нормативних документів, в тому числі Єврокодів, а також впровадження стандартів надійності та довговічності з урахуванням найкращих світових методик.

Постановка завдання. Таким чином, метою виконання даної роботи є визначення технічного стану водопропускної труби з аналізом необхідних ремонтних робіт.

Науковою новизною отриманих результатів дослідження є встановлення на водопропускній споруді характерних дефектів та визначення методів їх ремонту, так як даних тип споруд є нетиповим та потребує індивідуальних підходів, вперше розглянуто можливість застосування традиційних методів ремонту в порівнянні з інноваційним сучасним методом відновлення. Даний тип споруди є унікальним в своєму роді, маючи як історичну цінність так і стратегічне значення, що унеможлиблює виконання її відновлення з розкриттям насипу та потребує розгляду різних підходів ремонту.

Виклад основного матеріалу. Водопропускна труба перетинає балку, під час обстеження балка суха без наявності тимчасового водотоку долини із задернованими схилами. Водопропускна труба розташована під залізничною колією на км 217 ПК 1 + 21, Хмельницька область, Кам'янець-Подільський район.

Дата будівництва труби — 1912-1914 рр. (експлуатується по сьогоднішній день). Лінійний об'єкт інженерно-транспортної інфраструктури: залізнична колія. Категорія колії — IV, вантажонапруженість 7,4 млн.т.км брутто / км за рік; добові розміри руху на ділянці складають 16 пар поїздів.

Дані про попереднє обстеження — відсутні. Дані про ремонт водопропускної споруди — відсутні. Про пропуск наднормативних навантажень даних немає.

Обстеження проводилося з урахуванням ДБН В.2.3-6 [7], ДБН В.2.3-22 [8], ДСТУ 9123 [9], ДСТУ Б В.2.3-24 [10].

Загальний вигляд водопропускної труби наведено на рис. 1.



Верхній б'єф, вхідний отвір (ліворуч за ходом пікетажу з/д колії)

Нижній б'єф, вихідний отвір (праворуч за ходом пікетажу з/д колії)

Рисунок 1 — Розміщення водопропускної труби через балку на карті

Джерело: розроблено авторами

Загальна характеристика водопропускної труби: довжина водопропускної труби — 43,26 м; схема водопропускної труби — $1 \times 2,38 + 7 \times 5,50 + 1 \times 2,38$ м; отвір труби (висота склепіння) — 5,7 м.; товщина стінок — геометрично неоднорідна, на товщину мощення; висоту насипу — вхідний, від рівня арки до ж/д колії — 12,73 м, вихідний, від рівня арки до ж/д колії — 11,54 м.; тип оголовка — розтрубний; кут перетину осі труби та осі залізниці — $\square 90^\circ$; тип гідроізоляції — не виявлено; поздовжній ухил — 15‰.

Вигляд ланок наведено на рис. 2. Відкісна стінка на вході в трубу — 8,4 м. Відкісна стінка на виході з труби — 7,4 м. Повна висота порталу вхідного отвору — 7,00 м; вихідного — 5,80 м. Дані по фундаментах відсутні. Обстеження підземної частини водопропускної труби не проводилося. Дно балки земляне, мулисте. Частина русла заросла чагарниками. Балка суха без наявності тимчасового водотоку долини із задернованими схилами. Обстежувалися підходи довжиною 100 м з кожного боку водопропускної труби.



Рисунок 2 — Вигляд ланок

Джерело: розроблено авторами

На основі проведених обстежень встановлені наступні дефекти ланок водопропускної труби: пошкодження розчину кладки (Ланка 1 — 9); порожнини в камені (Ланка 1 — 9); втрата розчину кладки (Ланка 1 — 9); вивали фрагментів кладки (Ланка 1 — 9); висоли на поверхнях кладки (Ланка 1 — 9); тріщини кладки (Ланка 1 — 9); сліди вилугування бетону; пошкодження бетону від вилугування; пошкодження захисного шару бетону (Ланка 1 — 9); тріщини в розтягнутому бетоні (Ланка 1 — 9); поздовжні тріщини бетону (Ланка 1 — 9); численні тріщини (Ланка 1, 2, 9); наявність окремих тріщин, волосяна сітка тріщин (Ланка 1 — 9); раковини на зовнішній поверхні елемента (Ланка 1 — 9); замокання на зовнішній поверхні елемента, фільтрація води крізь елемент (Ланка 1 — 9).

Приклад стану елементів прогонової будови наведено на рис. 3.



Рисунок 3 — Ланка 1 - 2 Сліди вилугування бетону. Пошкодження бетону від вилугування, раковини бетону

Джерело: розроблено авторами

Технічний стан ланок труби – Стан 3 «Працездатний» [10] на межі із Станом 4 «Обмежено працездатний» [10].

По оголовкам, під час обстеження виявлено дефекти: пошкодження розчину кладки (вхідна, вихідна); порожнини в камені (вхідна, вихідна); втрата розчину кладки (вхідна, вихідна); вивали фрагментів кладки (вхідна, вихідна); висоли на поверхнях кладки (вхідна, вихідна); тріщини кладки (вхідна, вихідна); порость рослин (вхідна, вихідна); замокання на зовнішній поверхні елемента, фільтрація води крізь елемент.

Приклад стану оголовків наведено на рис. 4.



Рисунок 4 — Порость рослин, вихідний оголовок, руйнування кам'яних елементів

Джерело: розроблено авторами

Фундаментам призначено технічний стан «Стан 3. Працездатний» [10]. Опосередкованих ознак дефектів фундаментів не виявлено.

По руслу призначено технічний стан «Стан 4. Обмежено працездатний» [10]. Виявлено заростання русла деревами та чагарником, замулювання живого перерізу отвору труби, підмивання водою конструкції русла в середині труби. Приклад стану русла наведено на рис. 5.



Рисунок 5 — Заростання русла деревами та чагарником

Джерело: розроблено авторами

Зйомка підходів виконувалася для їх візуалізації, призначено технічний стан «Стан 2. Справний» [10].

На основі проведених вимірів наведено загальних план споруди (рис. 6).

Під час обстеження застосовано технічне нівелювання, що дає можливість визначити висотне положення труби, поздовжні і поперечні похили по руслу труби.

Репер «RP0» = 100,000 м — металева арматура пофарбована червоним кольором діаметром 12 мм та довжиною 1,2 м забита у ґрунт у верхньому б'єфі, на вході в трубу (табл. 1, рис. 7). Результати нівелювання наведені на рис. 8. Відмітки прийняті умовні.

Згідно з ДСТУ Б В.2.7-220 [11] виконано визначення поверхневої міцності бетону конструктивних елементів водопропускної труби.

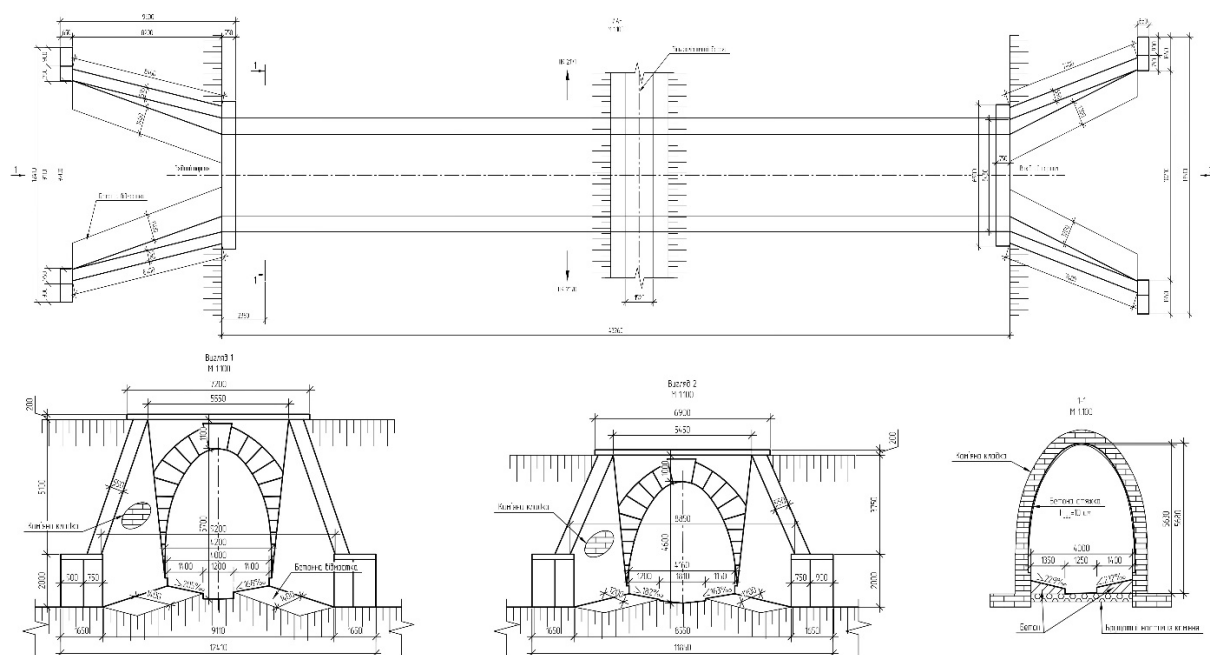


Рисунок 6 — Загальний вигляд

Джерело: розроблено авторами

Поверхнева міцність бетону на стиск визначена методом пружного відскоку проводилося механічним склерометром МШ-225 (енергія удару 2207 Дж) для бетону товщиною від 70 мм.

Випробування поверхневої міцності бетону проводилися за температури повітря 18 °С. Визначення показників міцності бетону проводилося на поверхнях, які не мають дефектів (рис. 9).

Результати досліджень фактичної міцності бетону елементів конструкції на стиск (при їх середніх значеннях) становить: бетон оправи, ланка (секція) 2 — 16,0 МПа.

Розрахункові характеристики бетону приймати згідно з Таблицею 3.6 ДБН В.2.3-14 [12].

Таблиця 1 — Координати репера

№ точки	WGS-84		Висота, м	Назва точки
	широта	довгота		
1	48,78911	26,60496	100,000	RP0

Джерело: розроблено авторами



нівелювання зі сторони верхнього б'єфу, репер «RP0»

нівелювання зі сторони нижнього б'єфу

Рисунок 7 — Нівелювання споруди

Джерело: розроблено авторами

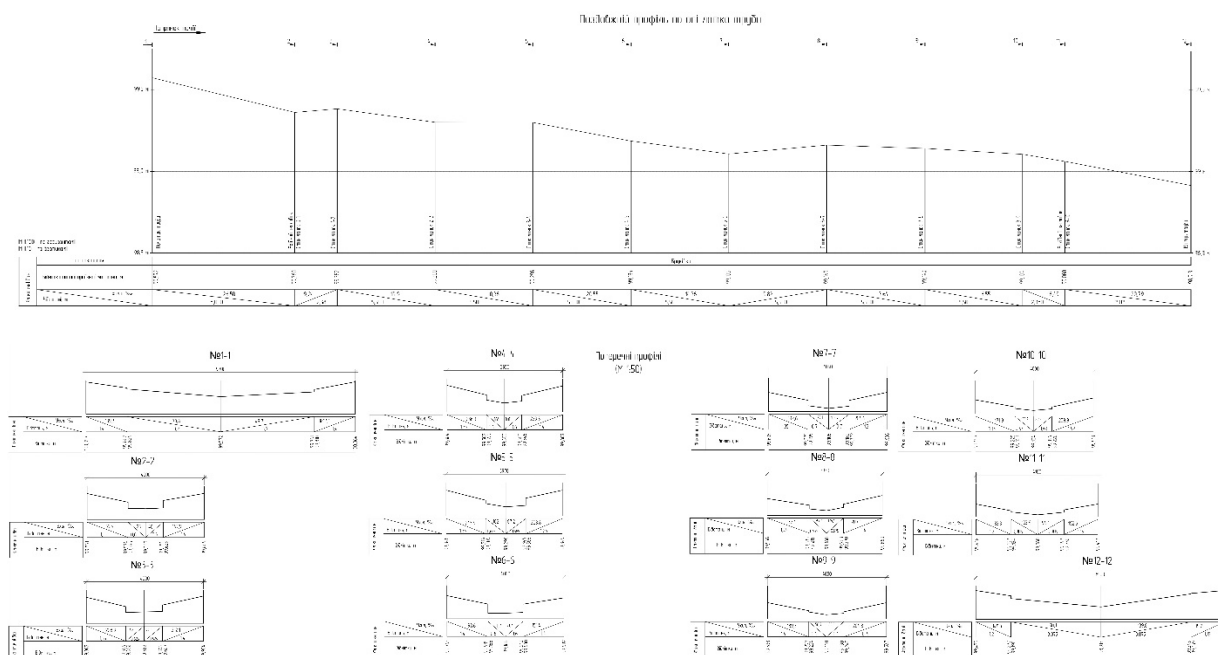


Рисунок 8 — Інструментальна зйомка. Поздовжній та поперечні профілі

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 9 — Визначення поверхневої міцності бетону на тиск, місце випробування — Ланка 2

Джерело: розроблено авторами

За результатами обстеження та виявленим дефектам водопропускної труби призначається технічний Стан 3 «Працездатний» [10] на межі із Станом 4 «Обмежено працездатний» [10]. Залишковий ресурс труби до переходу в Стан 5 «Не працездатний» — 15 років (ДСТУ Б В.2.3-24, Додаток Д [10]). Рекомендований мінімальний ресурс труби після капітального ремонту — 25 років.

Рекомендовано наступне планове обстеження провести не пізніше ніж 01 листопада 2027 року. Рекомендовано виконати капітальний ремонт.

Рекомендації щодо ремонту: Ремонтні заходи рекомендується приймати на основі техніко-економічного обґрунтування з порівняннями технічних варіантів.

Підготовчі роботи необхідно виконати відповідно до «Порядку виконання підготовчих та будівельних робіт, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 13.04.2011 р. № 466» [13].

На основі проведеного обстеження доцільно розглянути наступні варіанти щодо проведення ремонтних заходів:

1. Бетонний лоток в середині водопропускної труби потребує демонтажу та влаштування нового відповідного лотка.

2. Необхідно виконати чищення елементів ланок та відкисних стінок від порості дерев та рослин.

Встановити геометричну рівність елементів споруди.

Необхідно пошкоджену кладку демонтувати та влаштувати і із заміною пошкодженого каменю. За необхідності виконується підсилення пошкоджених елементів, з можливою заміною існуючої кам'яної кладки водопропускної труби з матеріалів вищої якості від існуючих

(міцність на стиск, морозостійкість, водонасичення, щільність). У випадку недотримання несної здатності після демонтування пошкодженої кладки, потрібно виконати заходи з підсилення, додаткове підсилення повинно бути $\frac{1}{2}$ від існуючої кам'яної кладки [14].

Кам'яну кладку водопропускної труби раціонально відновлювати із застосуванням методу ін'єктування тріщин, що дасть змогу відновити її несну здатність.

Найпоширенішим матеріалом ін'єктування тріщин є розчини на основі мінеральних та полімерних в'язучих речовин, а склад, тип та властивості розчину підбираються відповідно до властивостей та умов експлуатації кам'яної кладки водопропускної труби.

Одним із заходів відновлення несної здатності водопропускальної труби можна досягнути за рахунок застосування додаткових елементів підсилення конструкції.

Підсилення кам'яних конструкцій рекомендується методом влаштування шару залізобетону. Армування слід приймати, як робоче вздовж і поперек труби.

Ремонтні заходи можуть передбачати влаштування додаткових арматурних стрижнів [15].

Під час застосування підсилення водопропускної труби додатковим шаром залізобетону мінімальною товщиною – 20 см слід передбачити залізобетонний лоток труби який буде виконувати роль фундаменту для елементів підсилення.

Робота існуючої конструкції та конструкції підсилення повинна вступати в роботу як одна ціла із застосуванням різних методів омоноличування [14]. Найпростішим способом є застосування арматурних стрижнів у якості анкерів, діаметром 8 мм – 12 мм, за необхідності більшого діаметру. Глибина закладання анкерів повинна становити не менше ніж 15 – 20 діаметрів арматури з кроком 40 мм за висотою, 60 мм - 70 мм за довжиною, розташування анкерів відбувається зі зміщенням, а глибина отворів для анкерів в 1,5 рази більша за діаметр, з подальшим нанесенням розчинів на основі мінеральних чи полімерних в'язучих речовин [14].

Першочергово необхідно відновити/забезпечити жорсткість водопропускної труби.

За наявності тріщин понад 3 мм необхідно їх герметизувати ремонтним розчином на основі мінерального або полімерного в'язучого, з дотриманням облицювання тріщин, якщо передбачаються такі заходи.

За необхідності тріщини в кам'яній кладці розширити і влаштовується новий цементно-піщаний, цементно-полімерний розчин.

3. Виконати забезпечення відсутності фільтрування води через ланки водопропускної труби, за рахунок ін'єктування гідроізоляційного розчину.

В місцях сколів необхідно виконати роботи з підготовки поверхні бетону для виконання ремонтних заходів — його чищення, обезпилення та ґрунтування. Виконання ремонту, як правило, передбачає застосування фінішних ремонтних сумішей (або іншою ремонтною сумішшю), що наносяться без застосування засобів механізації. Подальше нанесення вторинного захисту бетону від корозії.

В місцях тріщин та волосяної сітки тріщин необхідно виконати роботи з підготовки поверхні бетону для виконання ремонтних заходів — його чищення, обезпилення та ґрунтування. Виконання ремонту, як правило, передбачає застосування фінішних ремонтних сумішей (або іншою ремонтною сумішшю), що наносяться без застосування засобів механізації, або нагнітання спеціальних ремонтних розчинів в місця руйнування. Подальше нанесення вторинного захисту бетону від корозії.

Тріщини, що мають поверхневий характер з шириною до 2 мм та проникністю, що перевищує товщину захисного шару бетону над арматурними стержнями, вимагають проведення заходів з використанням відповідних сумішей для ремонту, параметри яких обираються в залежності від характеру руйнування, з можливим збільшенням ширини тріщини під час ремонту, що підвищить ефективність виконання ремонтних робіт [14].

Тріщини, що мають поверхневий характер з шириною до 0,5 мм та проникністю, що не перевищує товщину захисного шару бетону над арматурними стержнями та впливають лише на естетику споруди, можуть бути відремонтовані за допомогою ремонтних сумішей для виконання косметичного ремонту, із забезпеченням рівності відремонтованої основи [14].

Необхідно виконати підсилення бетонних та залізобетонних елементів в місцях руйнування бетону та його замочування.

Під час експлуатації, за неможливості зниження навантажень на конструкцію та для забезпечення надійної її роботи при зміні умов її експлуатації, конструкції рекомендується підсилювати з метою відновлення або підвищення проєктних експлуатаційних характеристик.

Необхідно виконати заходи із захисту від замочування елементів ланки 1 — 9 та відкисних стінок.

Ліквідацію ушкоджень гідроізоляції ланки 1 — 9 та відкисних стінок.

Рекомендовано виконати заходи з підвищення міцності бетону конструкції на ланці 1 — 9, що в свою чергу передбачають застосування ін'єктування, просочення цементно-полімерними та клейовими композиціями.

Необхідно виконати заходи з підсилення зони стиснення із виконанням заміни пошкоджених елементів.

Також в зоні оголовків рекомендується частково розкрити конструкції порталу та відкисних стінок для відновлення гідроізоляції та влаштування цементної відмостки для запобігання розмиву ґрунту та замокання склепіння в зоні порталльної стінки.

4. На підходах необхідно виконати планові заходи з утримання залізничної колії.

5. Русло потребує чищення від дерев, чагарників, покіс трав, а також профілювання внаслідок акумуляцію ґрунтового наносу.

Необхідно виконати заходи з укріплення русла кам'яною накидкою, шар кам'яного матеріалу повинен складати до 0,5 м.

Кам'яне кріплення виконують у вигляді накиду або намощування. Воно призначене для захисту споруди, а також частин укосів. Дане кріплення просте, надійне, гнучке. Кам'яне кріплення складається з двох шарів: каменю та зворотного фільтру. В якості зворотного фільтру найчастіше використовується геотекстиль. Під час монтажу кам'яне кріплення не потребує спеціальної техніки, вкладання може здійснюватися вручну. Камінь є довговічним та недорогим матеріалом.

За необхідності розбирання насипу над трубою, необхідно врахувати, що існуюча аркова конструкція труби знаходиться в рівновазі за рахунок рівномірно ущільненого ґрунту, тобто власної ваги труби та насипу. Рекомендується передбачити проєктні заходи щодо забезпечення геометричної незмінності труби під час розбирання насипу та контроль геометричних параметрів елементів труби під час будівельних робіт, так як розбирання насипу може вивести з рівноваги існуючу систему.

6. Рекомендовано для підвищення довговічності водопропускної труби влаштувати металеву гофровану трубу методом гільзування із заповненням міжтрубного простору.

Висновки. Практична цінність отриманих результатів пов'язана з класифікацією виявлених дефектів та пропозицією з їх ремонту, так як дана споруда є унікальною та єдиною в своєму роді в Україні. Запропоновано заходи ремонту від класичних підходів зі збереженням першопочаткової споруди до ремонту із застосуванням сучасних методів гільзування, котрі є унікальними в своєму роді.

1. За результатами обстеження та виявленим дефектам водопропускної труби призначається технічний Стан 3 «Працездатний» [10] на межі із Станом 4 «Обмежено працездатний» [10]. Залишковий ресурс труби до переходу в Стан 5 «Не працездатний» [10] — 15 років. Рекомендований мінімальний ресурс труби після капітального ремонту — 25 років.

2. Враховуючи чину нормативно-правову базу методи визначення технічного стану водопропускних труб базуються, в першу чергу, на візуальному огляді. Інструментальні заміри є важливою складовою, але слугують опосередкованими ознаками для прийняття рішення експерта про технічний стан споруди в цілому, так і окремих елементів. Сучасна нормативна база України не передбачає чіткого поділу на кількісні та якісні заміри під час обстежень водопропускних труб, а також не має переліку обов'язкових контрольованих параметрів споруд.

3. Картка труби, що є обов'язковою для складання згідно з ДБН В.2.3-6-2009 [7], на сьогодні не враховує всіх особливостей існуючих труб, а особливо гофрованих та кам'яних. Картка труби не містить достатньо інженерно-технічних даних для прийняття попередніх проєктних рішень та підрахунку мінімальної очікуваної вартості з ремонтних робіт.

4. Загальна площа ремонтних робіт визначається із геометричних розмірів труби наведених на креслені. Враховуючи вік та технічний стан споруди рекомендується виконувати

капітальний ремонт із підсиленням по всій площі труби. Рекомендується передбачити проектні заходи щодо забезпечення геометричної незмінності труби під час розбирання насипу та контроль геометричних параметрів елементів труби під час будівельних робіт, так як розбирання насипу може вивести з рівноваги існуючу систему.

Відкриті питання. Актуальним відкритим науково-технічним питанням залишається недосконала нормативно-правова база з оцінювання та прогнозування технічного стану водопропускних труб на автомобільних та залізничних шляхах. Щодо мостових споруд, то це питання актуалізується за рахунок ДСТУ 9123:2021, що є переписаним ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009, який розроблено на кафедрі Мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національного транспортного університету.

Подяка. Колектив авторів виражає подяку за підтримку наукової роботи Хмельницькій дистанції колії регіональної філії «Південно – Західна залізниця» АТ «Українська залізниця», ФОП Цапок Ярослав Олегович та LLC Ukrainian Bridge Company.

Список літератури

1. Гаркуша М. В. Досвід експлуатації та особливості роботи водопропускних споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 29. С. 235 – 250. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.235> (дата звернення 01.03.2025).
2. Коваль П. М., Фаль А. Є., Бабяк І. П., Сітдикова Т. М. Нормативне забезпечення проектування і будівництва споруд з металевих гофрованих конструкцій. *Дороги і мости*. Київ, 2008. Вип. 8. С. 154 – 158. URL: http://dorogimosti.org.ua/files/upload/Uz_21.pdf (дата звернення 01.03.2025).
3. Damian Beben (2020). *Soil-Steel Bridges. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. Springer Nature Switzerland AG 2020. P. 214. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34788-8> (дата звернення 01.03.2025).
4. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В. Технічний стан транспортних споруд з металевих гофрованих конструкцій. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. Дніпро, 2021. Вип. 19. С. 38–50. URL: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233873> (дата звернення 01.03.2025).
5. Давиденко О. О., Гаркуша М. В., Козарчук І. А., Гаркуша І. Ю. Підходи техніко-економічного обґрунтування нового будівництва моста. *Вісник ХНАДУ*, Харків, 2024. Вип. 104. С. 96 – 106. URL: [10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.0.96](https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.0.96) (дата звернення 01.03.2025).
6. Transportation Research Circular E-C230 (2014). *Culverts and Soil-Structure Interaction: Fifty Years of Change and a Twenty-Year Projection*. Transportation Research Board, P. 57. [in English]. URL: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec230.pdf> (дата звернення 01.03.2025).
7. ДБН В.2.3-6:2009 Мости та труби. Обстеження і випробування. Чинний від 2010-03-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 43 с.
8. ДБН В.2.3-22:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Чинний від 2010-03-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 52 с.
9. ДСТУ 9123:2021 Настанова з обстеження та випробування мостів і труб. Чинний від 2022-07-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 43 с.
10. ДСТУ Б В.2.3-24:2009 Труби дорожні. Обстеження та оцінювання технічного стану. Чинний від 2010-08-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2009. 29 с.
11. ДСТУ Б В.2.7-220:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. Чинний від 2010-09-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2009. 34 с.
12. ДБН В.2.3-14:2006 Мости і труби. Правила проектування. Чинний від 2007-02-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2006. 217 с.
13. Деякі питання виконання підготовчих і будівельних робіт: Постанова Кабінету Міністрів України від 13.04.2011 р. № 466: станом на 04 лют. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/466-2011-%D0%BF#Text> (дата звернення 01.03.2025).
14. ДСТУ Б В.3.1-2:2016 Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. Чинний від 2017-04-01. Вид. офіц. Київ : ДП «НДІБК», 2016. 72 с.
15. Клименко Є. В., Білоус І. О. Методи підсилення кам'яних конструкцій. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2014. Вип. 54. С. 153-158. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba_2014_54_28 (дата звернення 01.03.2025).

References

1. Harkusha M. V. (2024). Experience of operation and features of operation of culverts made of corrugated metal structures on highways. *Roads and Bridges*, 29, 235 – 250 [in Ukrainian]. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.235>.
2. Koval P. M., Fal A. E., Babyak I. P., Sitdykova T. M. (2008). Regulatory support for the design and construction of structures made of corrugated metal structures. *Roads and Bridges*, 8, 154 – 158 [in Ukrainian]. URL: http://dorogimosti.org.ua/files/upload/Uz_21.pdf.

3. Damian Beben (2020). *Soil-Steel Bridges. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. Springer Nature Switzerland AG 2020. P. 214 [in English]. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34788-8>
4. Luchko Y. Y., Kovalchuk V. V. (2021). Technical condition of transport structures made of corrugated metal structures. *Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 19, 38–50 [in Ukrainian]. URL: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233873>.
5. Davydenko O. O., Harkusha M. V., Kozarchuk I. A., Harkusha I. Yu. (2024). Approaches to the feasibility study of a new bridge construction. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 104, 96–106 [in Ukrainian]. URL: [10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.0.96](https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.0.96)
6. Transportation Research Circular E-C230 (2014). *Culverts and Soil-Structure Interaction: Fifty Years of Change and a Twenty-Year Projection*. Transportation Research Board, P. 57. [in English]. URL: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec230.pdf>
7. Minregionalbud of Ukraine (2009). *Bridges and pipes. Inspection and testing*. (DBN V.2.3-6:2009). Kyiv [in Ukrainian].
8. Minregionalbud of Ukraine (2009). *Transport structures. Bridges and pipes. Basic design requirements*. (DBN V.2.3-22:2009). Kyiv [in Ukrainian].
9. State Enterprise «UkrNDNC» (2022). *Guidelines for the inspection and testing of bridges and pipes*. (DSTU 9123:2021). Kyiv [in Ukrainian].
10. State Enterprise «UkrNDNC» (2009). *Road pipes. Inspection and assessment of technical condition*. (DSTU B V.2.3-24:2009). Kyiv [in Ukrainian].
11. State Enterprise «UkrNDNC» (2009). *Building materials. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of non-destructive testing*. (DSTU B V.2.7-220:2009). Kyiv [in Ukrainian].
12. Minregionalbud of Ukraine (2006). *Bridges and pipes. Design rules*. (DBN V.2.3-14:2006). Kyiv [in Ukrainian].
13. Some issues of carrying out preparatory and construction works: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine. (2011, April 13). № 466. (2025, February 04). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/466-2011-%D0%BF#Text>.
14. State Enterprise «NIIBK» (2016). *Repair and strengthening of load-bearing and enclosing building structures and foundations of buildings and structures*. (DSTU B V.3.1-2:2016). Kyiv [in Ukrainian].
15. Klymenko E. V., Bilous I. O. (2014). Methods of strengthening stone structures. *Bulletin of the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 54. 153–158 [in Ukrainian]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba_2014_54_28.

Oleksandr Davydenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Harkusha**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Kozarchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Pavlo Kazak**, **Yaroslav Tsapko**
National Transport University, Kyiv, Ukraine

Methods for Determining the Technical Condition of a Culvert With an Analysis of the Necessary Repair Work

Recently, there has been a deterioration in the condition of culverts, including those that were previously constructed, which is caused by the impact of the environment, physical wear and aging of materials and structures, increased axial loads, increased traffic flow, etc.

The importance of transport structures, due to factors such as their strategic location, calls for the need to find modern construction solutions that combine fast execution, low cost, and satisfactory service life.

Ongoing research and development in Europe include methods for determining the load-bearing capacity of existing bridges and structures; methodology for designing to assess fatigue resistance and ability to withstand cyclic loading; design methods for high-speed train load; life-cycle cost analysis, including consideration of environmental impact and the use of recycled materials.

Future European research includes modern corrosion protection systems; higher-grade steel; deeper, larger corrugations; alternative metals and other materials; improved connection systems; improved backfilling; online monitoring systems for structures.

Therefore, a current issue today is the use of modern approaches for carrying out repair measures with the application of effective repair materials to restore the operational properties of structures.

It is recommended to provide design measures to ensure the geometric invariability of the pipe during the dismantling of the embankment and control the geometric parameters of the pipe elements during construction work, since the dismantling of the embankment can bring the existing system out of balance.

An actual open scientific and technical issue remains the imperfect regulatory framework for assessing and predicting the technical condition of culverts on highways and railways.

The work determines the technical condition of culverts and provides recommendations for its repair.
culvert, defects, repair, technical condition

Одержано (Received) 17.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 14.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

УДК 620.97:697.329

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.224-231](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.224-231)

С. Й. Мисак, доц., канд. техн. наук, С. П. Шаповал, проф., д-р техн. наук,
М. Я. Кузнецова, доц., канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

e-mail: stepan.p.shapoval@lpnu.ua

Аналіз ефективності інноваційного гібридного теплового фотоелектричного колектора

Дослідження присвячене розробці та оптимізації гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК), здатного максимально ефективно використовувати сонячне випромінювання. Здійснено експериментальні випробування та аналіз впливу кутів нахилу ГТФГК та інтенсивності падаючого на нього сонячного випромінювання на теплову й електричну ефективність геліосистеми. Результати демонструють перспективи впровадження запропонованої ГТФГК для модернізації енергетичної інфраструктури.

відновлювальні джерела енергії, гібридний тепловий фотоелектричний колектор, сонячне випромінювання, ефективність, концентратор, фотоелемент

Постановка проблеми. Глобальні кліматичні зміни, що набирають все більшого масштабу, разом із прогнозами провідних наукових організацій [1] вказують на невідкладну необхідність радикального зниження шкідливих викидів та поступової відмови від традиційних джерел енергії. Стрімке зростання техногенного впливу на довкілля змушує світове співтовариство активно впроваджувати політику сталого розвитку [2], орієнтовану на впровадження екологічно безпечних технологій та мінімізацію негативного впливу промисловості на природу.

Перехід на відновлювані джерела енергії перестає бути лише перспективним напрямом і стає нагальною необхідністю [3]. Від цього залежить не лише збереження природних ресурсів, а й глобальна енергетична безпека, стабільність економічних процесів та якість життя майбутніх поколінь [4]. Використання сонячної, вітрової та інших відновлюваних видів енергії є ключовим кроком до побудови чистішого, стійкішого та екологічно відповідального світу.

Ключовим завданням є розробка інноваційних конструктивних і технологічних рішень, спрямованих на максимальне поглинання сонячного випромінювання та зниження енергетичних втрат. Це передбачає інтеграцію теплових і фотоелектричних компонентів у єдину, гібридну систему, впровадження новітніх матеріалів з покращеними тепло- і світлопоглинальними властивостями, оптимізацію процесів теплообміну.

Розв'язання цієї проблеми відкриває широкі перспективи для розвитку сонячної енергетики. Завдяки кращій енергоефективності та оптимальній ціні гібридні системи сонячного енергопостачання стануть доступнішими для широкого впровадження в побутовій та промисловій сферах, що сприятиме скороченню викидів вуглекислого газу від викопного палива і масштабному, критично важливому переходу на екологічно чисті джерела енергії [3].

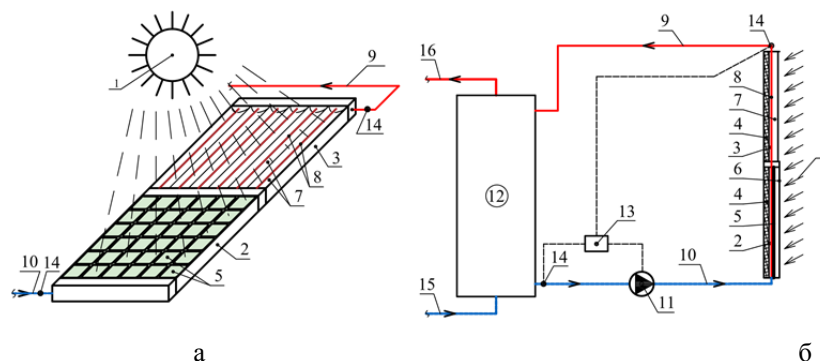
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Глибокий аналіз сучасних наукових публікацій засвідчує важливість комбінування різних типів геліоколекторів задля оптимального використання сонячного випромінювання. Адже важливим недоліком традиційних фотоелектричних панелей є низька ефективність із-за нерівномірного охолодження їх поверхні: із загальної кількості сонячного випромінювання, що потрапляє на їхню поверхню, лише 15 % перетворюється на електроенергію, тоді як близько 10 % використовується у вигляді теплової енергії [5]. Іншими недоліками є висока вартість, технічні труднощі при інтеграції в наявні покрівельні конструкції, а

також потреба у більшому просторі для окремих систем [6]. Плоскі пластинчасті теплові сонячні колектори, які є найбільш поширеними, характеризуються низькою теплопередачею із-за малого коефіцієнта конвективного теплообміну між теплоносієм, що протікає в їх контурі, і поглиначем сонячної енергії. Враховуючи цей факт, для збільшення їх продуктивності, ефективності теплообміну та довговічності, що підтверджується теоретично і експериментально, запропоновано використання концентраторів сонячного випромінювання [7], інноваційних матеріалів, покращення технологічних і конструктивних рішень [8, 9].

Гібридні сонячні колектори стають ключовим елементом сучасних енергетичних систем завдяки їхній компактності та унікальній здатності одночасно виробляти електричну та теплову енергію. Новітні дослідження підтверджують, що такі пристрої демонструють вищу продуктивність порівняно з традиційними фотоелектричними панелями та тепловими геліоколекторами, що робить їх особливо перспективними для широкого використання [10, 11]. Завдяки своїй гнучкості та адаптивності, гібридні геліосистеми здатні ефективно функціонувати в різних кліматичних умовах та відповідати специфічним технічним вимогам. Їхній принцип роботи поєднує характеристики як плоских теплових сонячних колекторів, так і фотоелектричних панелей, що дозволяє значно покращити загальну продуктивність. Проте для повноцінного розкриття їхнього потенціалу необхідно продовжувати оптимізацію теплових та електричних характеристик, а також впроваджувати технології, що збільшують термін експлуатації та покращують енергоефективність [12, 13].

Постановка завдання. Таким чином, метою є дослідження, яке зосереджене на розробці та вдосконаленні гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК) для максимально ефективного використання сонячного випромінювання. Увага приділяється підвищенню його теплової та електричної продуктивності. Оптимізація конструкції та правильне розміщення ГТФГК є ключовими факторами, що сприяють мінімізації теплових втрат та підвищенню ефективності його функціонування. Активне використання такого рішення сприятиме модернізації енергетичної інфраструктури, зміцненню економічної стабільності та створенню умов для сталого розвитку суспільства.

Виклад основного матеріалу. У цьому дослідженні аналізується робота гібридної системи енергопостачання (ГСЕ), що використовує гібридний тепловий і фотоелектричний геліоколектор (ГТФГК). Основна концепція такої системи полягає в одночасному перетворенні сонячної енергії в електричну та теплову, що підвищує її ефективність. Структурну схему цієї інноваційної установки представлено на рисунку 1.



а – вигляд збоку; б – вигляд зверху (1 – сонячне випромінювання; 2, 3 – теплофотоелектричний та тепловий модулі гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК); 4 – утеплення; 5 – фотоелементи; 6 – захисне скло; 7 – концентратори сонячного випромінювання; 8 – теплопоглинальні труби; 9, 10 – трубопроводи нагрітої та охолодженої води; 11 – циркуляційна помпа; 12 – тепловий акумулятор (ТА); 13 – контролер управління ГСЕ; 14 – температурні сенсори; 15, 16 – трубопроводи нагрітої та охолодженої води в системі споживача)

Рисунок 1 – Принципова схема ГСЕ з ГТФГК

Джерело: розроблено авторами

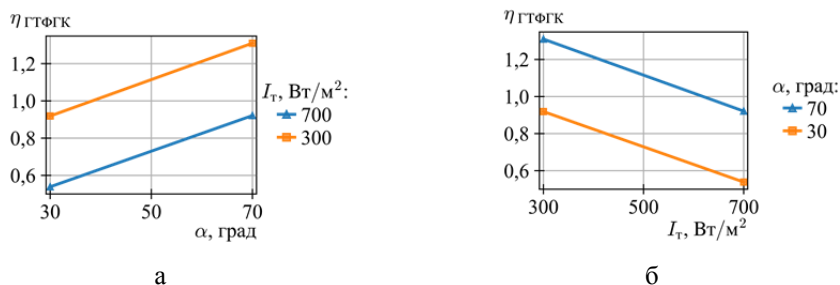
Гібридна система енергопостачання (ГСЕ), що представлена на рисунку 1, поєднує в собі гібридний тепловий фотоелектричний геліоколектор (ГТФГК) та тепловий акумулятор (ТА) 12. Основне завдання ТА— накопичення теплової енергії для споживачів, що утворюється в результаті поглинання сонячного випромінювання 1.

ГТФГК складається з двох основних модулів: теплофотоелектричного 2, який генерує як електроенергію, так і тепло, та окремого теплового модуля 3, що підвищує ефективність утилізації сонячної енергії. Для мінімізації тепловтрат ці модулі оснащені теплоізоляційним шаром 4. Виробництво електроенергії здійснюється завдяки фотоелементам 5, які отримують сонячне випромінювання 1 через захисне скло 6, що зменшує втрати енергії та захищає систему від впливу зовнішніх факторів. Крім того, у теплового модулі ГТФГК використані спеціальні концентратори сонячного випромінювання 7, які фокусують сонячну енергію на теплопоглинальних трубах 8, що дозволяє інтенсивніше нагрівати теплоносії. Передача теплової енергії між ГТФГК і ТА відбувається за допомогою теплоізованих трубопроводів 9 і 10, де нагріта вода за допомогою циркуляційної помпи 11 транспортується до ТА, а охолоджена повертається назад у ГТФГК. Робота циркуляційної помпи координується контролером 13, що аналізує дані температурних сенсорів 14 та автоматично регулює параметри системи для підтримки оптимального теплового режиму. Теплоносії у ТА через циркуляційні трубопроводи 15, 16 поступово віддає накопичене тепло споживачам, забезпечуючи стабільну роботу ГСЕ навіть при зміні інтенсивності сонячного випромінювання.

Для оцінки ефективності ГСЕ з ГТФГК проводилися експериментальні випробування при температурі навколишнього середовища $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. ГТФГК був орієнтований так, щоб його робоча площа залишалася строго перпендикулярною до сонячних променів, що дозволяло максимально ефективно використовувати сонячну енергію. Всі ключові параметри роботи системи реєструвалися з інтервалом у 5 хвилин, при цьому швидкість циркуляції теплоносія залишалася стабільною, що дозволяло отримати об'єктивні результати та оцінити потенціал подальшої оптимізації системи.

У рамках експериментальних досліджень представлено шість випробувань, які проводилися за питомої масової витрати теплоносія G , що циркулював у контурі системи, на рівні $0,01\text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$. А також, перші три дослідження, графічні результати яких наведені на рисунках 2–4, проводилися за умов фіксованого кута нахилу ГТФГК до горизонту $\beta = 30^{\circ}$, а решта, що на рисунках 5–7, – за інтенсивності сонячного випромінювання в його площині $I_T = 300\text{ Вт}/\text{м}^2$.

Графіки теплової ефективності $\eta_{\text{ГТФГК}}$ в залежності від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , $\text{Вт}/\text{м}^2$, побудовані на рисунках 2а та 2б.

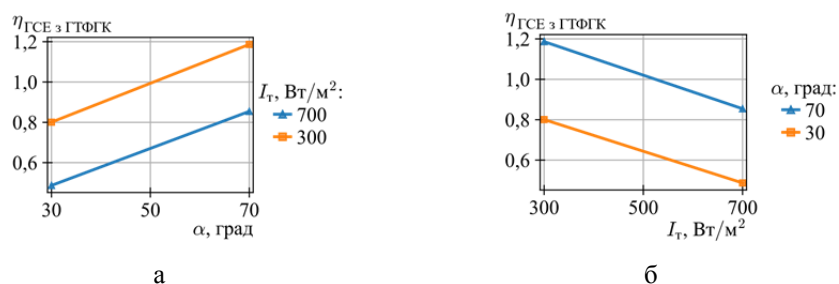


а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T ; б – залежність від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

Рисунок 2 – Зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ за постійних $\beta = 30^{\circ}$ та $G = 0,01\text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$
Джерело: розроблено авторами

З рисунка 2а можна зробити висновок, що зі збільшенням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α на 42 % та на 70 % зростають теплові ефективності $\eta_{\text{ГТФГК}}$ для інтенсивностей сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T відповідно 300 Вт/м² та 700 Вт/м². Тобто зі збільшенням α на кожні 10° $\eta_{\text{ГТФГК}}$ зростає на 0,1.

На основі аналізу експериментальних даних, що наведені на рисунку 2б, зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T спостерігається зменшення його теплової ефективності $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 29,8 % та 41,3 % для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α зі значеннями 70° та 30° відповідно. Отже, збільшення I_T на кожні 100 Вт/м² зменшує $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 0,1. На рисунках 3а і 3б зображено теплову ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$, яка залежить від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м².



а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T ; б – залежність від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

Рисунок 3 – Зміна теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ при $\beta = 30^\circ$ та $G = 0,01$ кг/(м²·с)
Джерело: розроблено авторами

Згідно з рисунком 3а, зі збільшенням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає на 48,7 % при інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T рівній 300 Вт/м² та на 73,5 % – при 700 Вт/м². Оскільки прямі ефективностей однаково нахилені, то збільшення α на кожні 10° збільшує $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ на 0,1.

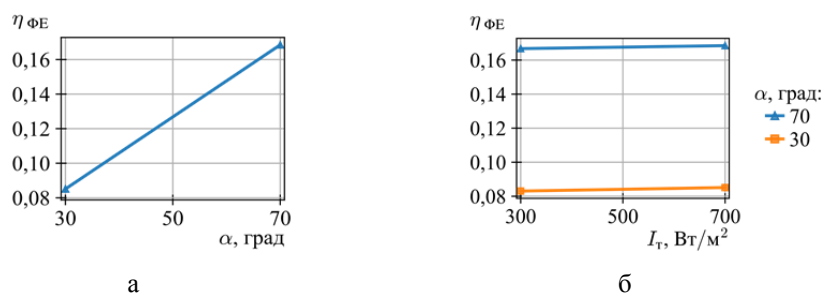
Як показано на рисунку 3б, зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T спостерігається зменшення теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ на 28,6 % та 38,8 % для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α зі значеннями 70° та 30° відповідно. Отже, при збільшенні I_T на кожні 125 Вт/м² $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зменшується на 0,1.

На рисунку 4а при інтенсивностях сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T рівних 300 Вт/м² і 700 Вт/м² представлено графік зміни електричної ефективності його фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$, який залежать від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, а на рисунку 4б – залежності $\eta_{\text{ФЕ}}$ від I_T та α .

Згідно з рисунком 4а, зі збільшенням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α електрична ефективність його фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ зростає майже вдвічі. При цьому на неї майже не впливає зміна інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T .

Згідно з аналізом рисунка 4б, електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , її

постійні значення для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 30° ϵ 0,084, а для 70° – 0,167.

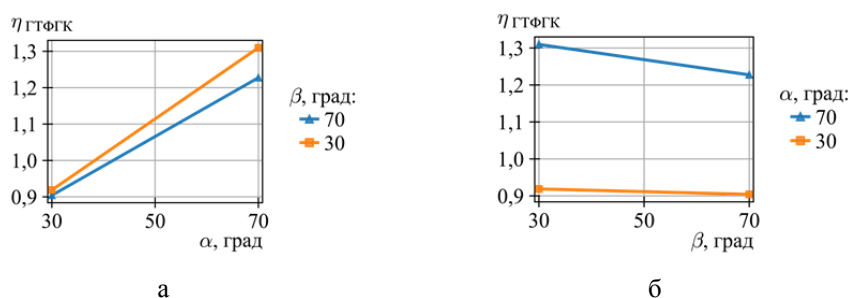


а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α при інтенсивностях сонячного випромінювання в його площині I_t рівних 300 Вт/м^2 і 700 Вт/м^2 ; б – залежність від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

Рисунок 4 – Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ при $\beta = 30^\circ$ та $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

Джерело: розроблено авторами

На рисунках 5а і 5б побудовані графіки теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ в залежності від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, та кута нахилу його до горизонту β , град.



а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α та кута нахилу його до горизонту β ; б – залежність від кута нахилу його до горизонту β та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

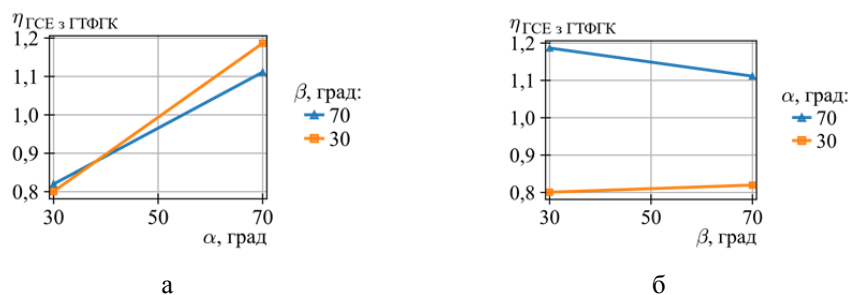
Рисунок 5 – Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ при $I_t = 300 \text{ Вт/м}^2$ та $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

Джерело: розроблено авторами

Згідно з рисунком 5а, при збільшенні азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α з 30° до 70° збільшує його теплову ефективність $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 36,7 % для кута нахилу ГТФГК до горизонту β рівному 70° та на 42,4 % – для 30° . Водночас зі зростанням β спадає $\eta_{\text{ГТФГК}}$.

На основі аналізу експериментальних даних, що наведених на рисунку 5б, теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ незначно залежить від кута нахилу його до горизонту β , на 2 % зменшившись при азимутальному куті відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 30° та на 6 % – при 70° . Збільшення α також призводить до зростання $\eta_{\text{ГТФГК}}$.

На рисунках 6а і 6б зображено теплову ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$, яка залежить від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, та кута нахилу його до горизонту β , град. Згідно з рисунком 6а, зі збільшенням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає на 48,7 % для кута нахилу ГТФГК до горизонту β рівному 30° та 35,4 % – для 70° . При α приблизно рівному 40° $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ не залежить від β і приблизно дорівнює 0,88.



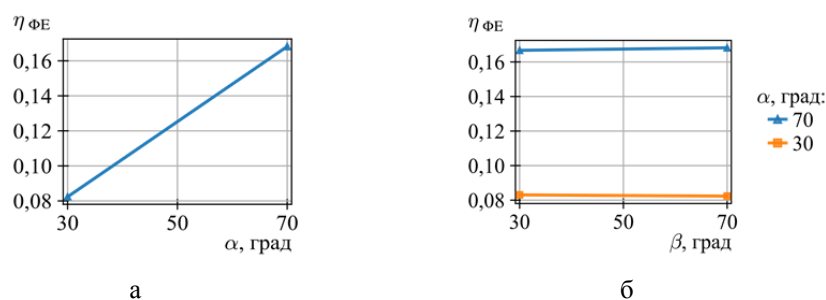
а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α та кута нахилу його до горизонту β ; б – залежність від кута нахилу його до горизонту β та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

Рисунок 6 – Зміна теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ при $I_T = 300 \text{ Вт/м}^2$ та $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

Джерело: розроблено авторами

Як показано на рисунку 6б, тепла ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ не дуже залежить від кута нахилу ГТФГК до горизонту β , тому лише на 2,5 % збільшується для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , що дорівнює 30° , та на 6,7 % – для 70° .

На рисунку 7а представлено графіки зміни електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$, які залежать від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α , град, при кутах нахилу його до горизонту β рівних 30° і 70° , а на рисунку 7б – від β та α .



а – залежність від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α при кутах нахилу його до горизонту β рівних 30° і 70° ; б – залежність від кута нахилу його до горизонту β та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α

Рисунок 7 – Зміна електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ за $I_T = 300 \text{ Вт/м}^2$ та $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

Джерело: розроблено авторами

Згідно з рисунком 7а, зі збільшенням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α електрична ефективність його фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від кута нахилу його до горизонту β і зростає вдвічі з 0,083 до 0,167.

Згідно з аналізом рисунка 7б, електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від зростання кута нахилу ГТФГК до горизонту β і становить 0,083 та 0,167 для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 30° та 70° відповідно.

Висновки. В результаті аналізу одночасного впливу різних факторів на роботу ГТФГК виявлено, що при куті нахилу його до горизонту $\beta = 30^\circ$ та питомій масовій витраті теплоносія $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α з 30° до 70° сприяє зростанню його теплової ефективності $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 42 % та 70 %, електричної ефективності $\eta_{\text{ФЕ}}$ – майже вдвічі, а також теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ на 48,7 % та 73,5 % для

інтенсивностей сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T , які дорівнюють 300 Вт/м² та 700 Вт/м² відповідно. Зі зміною I_T з 300 Вт/м² до 700 Вт/м² $\eta_{\text{ГТФГК}}$ і $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зменшуються в середньому на 29 % та 40 %, а $\eta_{\text{ФЕ}}$ залишається постійною при $\beta = 70^\circ$ і $\beta = 30^\circ$ відповідно.

При $I_T = 300$ Вт/м² та $G = 0,01$ кг/(м²·с) зі зростанням α з 30° до 70° ефективності також зростають: $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 36,7 % і 42,4 %, і $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ на 35,4 % і 48,7 %, $\eta_{\text{ФЕ}}$ удвічі для $\beta = 70^\circ$ і $\beta = 30^\circ$ відповідно. При $\alpha = 30^\circ$ збільшення β з 30° до 70° майже не впливає на $\eta_{\text{ГТФГК}}$ і $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$, змінюючи їх лише на 2 %. А при $\alpha = 70^\circ$ це збільшення призводить до зменшення $\eta_{\text{ГТФГК}}$ і $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ в середньому на 6 %. При цьому $\eta_{\text{ФЕ}}$ залишається постійною в обох випадках. Отже, на відміну від β , α значно впливає на теплову та електричну ефективність ГТФГК, які збільшуються при зменшенні I_T .

Проведення цих випробувань дозволило не лише встановити закономірності зміни основних робочих характеристик ГТФГК, а й проаналізувати вплив різних факторів на його продуктивність. Отримані результати слугуватимуть основою для подальшого вдосконалення конструкції та алгоритмів управління гібридною енергетичною системою.

Список літератури

1. Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. IPCC 2018. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf (дата звернення: 10.03.2023).
2. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. United Nations. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf> (дата звернення: 10.03.2023).
3. Paris Agreement. United Nations. URL: https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf (дата звернення: 10.03.2023).
4. The 2030 climate and energy framework. European Commission. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework> (дата звернення: 10.03.2023).
5. Ramos A., Guarracino I., Mellor A., Alonso-Elvarez D., Childs P., Ekins-Daukes N. J., Markides C. N.. Solar-thermal and hybrid photovoltaic-thermal systems for renewable heating. Briefing paper. 2017. Vol. 22. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10473.29280> (date of access: 28.03.2025).
6. Abdelhafez E. A., Hamdan M. A., and Al Aboushi A. R. Simulation of Solar Thermal Hybrid Heating System Using Neural Artificial Network. 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-8) : conference, Afyonkarahisar, Turkey, May 2016. P. 1–6.
7. Shapoval S., Spodyniuk N., Zhelykh V., Shepichak V., Shapoval P. Application of rooftop solar panels with coolant natural circulation. Pollack Periodica. 2021. Vol. 16, no 1. P. 132–137.
8. Diwania S., Agrawal S., Siddiqui A. S., Singh S.. Photovoltaic-thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2020. Vol. 11, no. 5. P. 33–54. URL: <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00327-y> (date of access: 28.03.2025).
9. Said Z., Alshehhi A. A., Mehmood A. Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. Renewable Energy. 2018. Vol. 118. P. 779–789. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.075> (date of access: 28.03.2025).
10. Mysak S., Shapoval S., Matiko H.. Simulation of Hybrid Solar Collector Operation in Heat Supply System. Energy Engineering and Control Systems. 2023. Vol. 9, no. 2. P. 61–62.
11. Суржик О. М. Теплофізичні характеристики геліоенергетичних модулів з композиційними тепловідводами : дис. ... канд. техн. наук. : 05.14.08. Київ., 2016. 159 с.
12. Venhryn I., Shapoval S., Voznyak O., Datsko O., Gulai B. Modelling of optical characteristics of the Thermal Photovoltaic Hybrid Solar Collector. International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies. 2021. Vol. 1. P. 255–258. URL: <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648738> (date of access: 28.03.2025).
13. Algarni S. Evaluation and optimization of the performance and efficiency of a hybrid flat plate solar collector integrated with phase change material and heat sink. Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 45. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102892> (date of access: 28.03.2025).

References

1. IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf
2. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf
3. United Nations (2015). Paris Agreement. [https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-](https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf)

- 03%20PM/ Ch_XXVII-7-d.pdf
4. European Commission. (2019). The 2030 climate and energy framework. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework>
 5. Ramos, A., Guarracino, I., Mellor, A., Alonso-Elvarez, D., Childs, P., Ekins-Daukes, N. J., & Markides, C. N. (2017). *Solar-thermal and hybrid photovoltaic-thermal systems for renewable heating*. Briefing paper, 22. doi: 10.13140/RG.2.2.10473.29280
 6. Abdelhafez E. A., Hamdan M. A., & Al Aboushi A. R. (2016) Simulation of Solar Thermal Hybrid Heating System Using Neural Artificial Network. Conference: *8th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-8)*, Afyonkarahisar, May 2016. Afyonkarahisar, Turkey, 1-6.
 7. Shapoval, S., Spodyniuk, N., Zhelykh, V., Shepichak, V., & Shapoval, P. (2021). Application of rooftop solar panels with coolant natural circulation. *Pollack Periodica*, 16(1), 132-137. doi: 10.1556/606.2020.00218
 8. Diwania, S., Agrawal, S., Siddiqui, A. S., & Singh, S. (2020). Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11, 33-54. doi: 10.1007/s40095-019-00327-y
 9. Said, Z., Alshehhi, A. A., & Mehmood, A. (2018). Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. *Renewable Energy*, 118, 779-789. doi: 10.1016/j.renene.2017.11.075
 10. Mysak, S., Shapoval, S., & Matiko, H. (2023). Simulation of Hybrid Solar Collector Operation in Heat Supply System. *Energy Engineering and Control Systems*, 9(2), 61-62.
 11. Surzhyk, O. M. (2016). *Thermophysical characteristics of solar energy modules with composite heat sinks*. Candidate's thesis. Kyiv: ONTU [in Ukrainian].
 12. Venhryn, I., Shapoval, S., Voznyak, O., Datsko, O., & Gulai, B. (2021). Modelling of optical characteristics of the Thermal Photovoltaic Hybrid Solar Collector. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 2021, 255d258. doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648738
 13. Algarni, S. (2023). Evaluation and optimization of the performance and efficiency of a hybrid flat plate solar collector integrated with phase change material and heat sink. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45. doi: 10.1016/j.csite.2023.102892

Stepan Mysak, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Stepan Shapoval**, Prof., Dr. tech. sci.,

Marta Kuznetsova, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Analysis of the Efficiency of an Innovative Hybrid Thermal Photovoltaic Collector

The research is devoted to the development and optimization of a hybrid power supply system (HPS) with a hybrid thermal photovoltaic solar collector (HTPSC), capable of using solar radiation as efficiently as possible. The aim of the research is to focus on the development and improvement of HTPSC for the most efficient use of solar radiation. Attention is paid to increasing its thermal and electrical performance. Optimization of the design and correct placement of the HTPSC are key factors that contribute to minimizing heat losses and increasing the efficiency of its operation. The active use of such a solution will contribute to the modernization of the energy infrastructure, strengthening economic stability and creating conditions for sustainable development of society.

The proposed design of the HTPSC consists of two modules: a thermal photovoltaic module, which simultaneously generates thermal and electrical energy (using photovoltaic cells), and a separate thermal module, which produces heat using solar radiation concentrators placed in it. All key parameters of the system were recorded at an interval of 5 minutes, while the coolant circulation rate remained stable. This ensured the objectivity of the results obtained and allowed us to assess the potential for further optimization of the system. Within the framework of experimental studies, six tests were conducted at an ambient temperature of 15 °C and a specific mass flow rate of the coolant in the system circuit $G = 0.01 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$. The first three studies were performed at a fixed angle of inclination of the HTPSC to the horizon $\beta = 30^\circ$, while the azimuthal angle of deviation of the normal to the HTPSC from the local meridian α and the intensity of solar radiation in its plane I_t were changed. The next three tests were carried out at $I_t = 300 \text{ W/m}^2$, with α and β remaining as variable parameters.

As a result of the first three experiments, it was found that increasing α from 30° to 70° contributes to an increase in the thermal efficiency of the HTPSC η_{HTPSC} by 42 % and 70 %, the electrical efficiency of photovoltaic cells η_{PC} by half, and the thermal efficiency of the HPS with HTPSC $\eta_{\text{HPS with HTPSC}}$ by 48.7 % and 73.5 % at I_t equal to 300 W/m^2 and 700 W/m^2 , respectively. With an increase in I_t from 300 W/m^2 to 700 W/m^2 , η_{HTPSC} and $\eta_{\text{HPS with HTPSC}}$ decrease on average by 29 % and 40 %, while η_{PC} remains constant at $\beta = 70^\circ$ and $\beta = 30^\circ$, respectively. In the next three experiments with an increase in α from 30° to 70° , the efficiency also increases: η_{HTPSC} by 36.7 % and 42.4 %, and $\eta_{\text{HPS with HTPSC}}$ by 35.4 % and 48.7 %, η_{PC} doubles for $\beta = 70^\circ$ and $\beta = 30^\circ$, respectively. With a fixed $\alpha = 30^\circ$, increasing the angle β from 30° to 70° has almost no effect on η_{HTPSC} and $\eta_{\text{HPS with HTPSC}}$, changing them by only 2 %. However, with $\alpha = 70^\circ$, the same increase in the angle β leads to a decrease in η_{HTPSC} and $\eta_{\text{HPS with HTPSC}}$ by an average of 6 %. At the same time, η_{PC} remains constant in both cases.

renewable energy sources, hybrid thermal photovoltaic collector, solar radiation, efficiency, concentrator, photovoltaic cell

Одержано (Received) 28.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 03.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025

УДК 625.084

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.232-240](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.232-240)

В. А. Настоящий, проф., канд. техн. наук, **Д. Ю. Артеменко**, доц., канд. техн. наук,
О. А. Кислун, доц., канд. техн. наук, **В. В. Дарієнко**, доц., канд. техн. наук,
І. О. Скриннік, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: artemenkodyu@kntu.kr.ua*

Обґрунтування конструкції котка для ущільнення свіже підготовленого ґрунту майданчика під майбутнє будівництво

В роботі показані результати пошукових науково-теоретичних досліджень конструктивних особливостей котка для ущільнення свіже підготовленого ґрунту майданчика під майбутнє будівництво. Під час аналізу конструкцій існуючих котків було встановлено, що вони не в повній мірі задовольняють вимогам до рівномірного ущільнення ґрунту по глибині і ширині робочої частини котка. Виявлено, що на рівномірність ущільнення ґрунту може істотно впливати конфігурація зовнішньої робочої поверхні котка в площині руху. Тому оптимізація конструкції робочої поверхні котка дозволить значно впливати на якість ущільнення, а подальша розробка нових конструкцій робочих поверхонь котків для ущільнення ґрунту є актуальною задачею. З цієї метою був запропонований новий коток призначений для якісного ущільнення свіже підготовленого ґрунту на максимальну глибину за мінімальну кількість проходів. За допомогою математичного моделювання досліджено процес взаємодії котка з ґрунтовим середовищем. Визначено, що основними факторами, які впливають на процес ущільнення, є конструкція робочого органу та фізико – механічні властивості ґрунту. Встановлено, що характер розподілення питомого тиску під робочою поверхнею котка відповідає його конструктивним особливостям. Ефективність запропонованої конструкції котка для ущільнення свіже підготовленого ґрунту забезпечується тим, що за рахунок конструкції його робочої поверхні можна забезпечити рівномірне ущільнення ґрунту по ширині захвату котка на максимальну глибину та зменшити кількість проходів котка для забезпечення необхідної рівномірності ущільнення.

ущільнення ґрунту, ґрунтовий коток, робоча поверхня котка, математична модель взаємодії котка з ґрунтом

Постановка проблеми. В процесі сучасного будівництва об'єктів сільськогосподарського призначення одним із ключових етапів є підготовка будівельного майданчика. Важливу роль при цьому відіграє попереднє ущільнення ґрунту під фундамент споруди та під'їзні дороги. Застосування цього технологічного прийому дає змогу запобігти такому небажаному явищу, як осідання ґрунту, що згодом може спричинити руйнування основи будівлі та прилеглих шляхів. Для реалізації цього процесу залучається широкий спектр будівельної техніки, серед якої найпоширенішими є котки різних видів: статичні [1], вібраційні з металевим ободом [2], а також вібраційні з пневматичним ободом [3]. Найвищу ефективність демонструють кулачкові котки, як статичного, так і вібраційного типу, що забезпечують задовільне ущільнення різних видів ґрунтів.

Проте однією з основних проблем, з якою стикаються під час використання будівельних котків, є недостатнє ущільнення свіже підготовленого ґрунту на майданчику. Відповідно до чинних нормативних вимог [4–8], ущільнення ґрунту перед зведенням споруд рекомендується виконувати пошарово, здійснюючи кілька проходів. Це суттєво збільшує витрати енергії, підвищує собівартість будівельних робіт і уповільнює загальний темп будівництва. З огляду на це актуальним завданням є підвищення продуктивності ґрунтових котків для забезпечення максимального ущільнення

грунту на значну глибину та рівномірного розподілу ущільнення по всій ширині захвату за мінімальну кількість проходів.

Аналіз основних досліджень і публікацій. На сьогоднішній день серед засобів ущільнення ґрунту найбільш поширеними є гладкі статичні котки циліндричної форми. Однак, за результатами досліджень Кушнар'ова А.С. [9], така форма не повністю відповідає вимогам щодо забезпечення рівномірної щільності ущільненого шару як у поперечному, так і в поздовжньому напрямку.

Аналіз ефективності роботи таких котків [10-12] показав, що їх конструкція не дозволяє досягти необхідних параметрів ущільнення ґрунту, що істотно знижує продуктивність роботи. Унаслідок цього застосування гладких циліндричних котків у сучасному будівництві поступово скорочується. Більш перспективними є котки, обладнані пневматичними шинами, які забезпечують кращу адаптацію до умов ущільнення. Використання вібраційних моделей з пневматичним ободом сприяє підвищенню ефективності процесу та зменшенню витрат, проте їх головним недоліком є низька ефективність на незв'язаних ґрунтах, що обмежує сферу їх застосування.

Хмара Л.А. в [13] особливу увагу приділяє кулачковим коткам і конструктивним особливостям їхніх елементів. Зроблено висновок, що при ущільненні суглинків такі котки мають значні переваги над циліндричними.

Проводячи огляд сучасних тенденцій у виробництві дорожніх котків Трофимов А.В. [14] відмічає, що на рівномірність ущільнення ґрунту може істотно впливати конфігурація зовнішньої робочої поверхні котка в площині руху.

Працюючи над вдосконаленням конструкції ущільнюючих котків автори в [15] пропонують робочу поверхню ущільнюючого котка виконувати опукло-криволінійною, а самі кулачки бочкоподібними та розміщеними по гвинтовій лінії. Така конструкція на думку авторів може забезпечити рівномірне ущільнення свіже підготовленого ґрунту по ширині захвату котка на максимальну глибину. Проте недоліком такого виконання можна вважати незначну глибину ущільнення самими кулачками.

У дослідженні [16] зазначається, що замість кулачкових ущільнювачів в нижніх шарах ґрунту може використовуватися просторова поверхня з опукло-криволінійним профілем. Авторами запропоновано конструкцію ущільнюваного котка дворівневої будови: верхній рівень представлений циліндричною робочою зоною із заокругленими краями, що відповідає за рівномірне ущільнення верхнього шару ґрунту, а нижній рівень утворюється спіралеподібною поверхнею з криволінійним опуклим профілем, який забезпечує якісне ущільнення глибших шарів. Завдяки такому конструктивному рішенню досягається рівномірний розподіл ущільнення як по глибині, так і по ширині захвату, що дозволяє зменшити кількість необхідних проходів. Водночас, основним недоліком запропонованої моделі є її конструктивна складність.

В [17] приділено увагу удосконаленню конструкції поверхні кулачків і пропонується виконувати їх в поперечній площині краплеподібними, а в напрямку руху напівеліптичними. Така конструкція може забезпечити усунення основного недоліку кулачкових котків – руйнування ущільненої поверхні під час виходу котка із ґрунту. Однак недоліком такого котка є складність виготовлення і велика вартість.

Литвиненко Т.В. [18] зазначає, що кулачкові котки добре підходять для роботи з грудкуватими ґрунтами, оскільки їх конструкція сприяє подрібненню грудок та формуванню рівномірної структури ущільненого шару. Однак їх використання у верхній частині насипу є недоцільним, оскільки кулачки сприяють додатковому розпушенню ґрунту. Для остаточного вирівнювання поверхні ефективніше застосовувати вальцеві котки, що формують гладку та рівну поверхню.

Із проведеного огляду визначено, що подальше вдосконалення будівельних котків потребує глибшого розуміння факторів, що визначають їх робочі характеристики. Дослідження [19,20] підтверджують наявність напружень і деформацій у внутрішньому об'ємі ґрунту під впливом ущільнювальних машин. Встановлено, що розподіл цих характеристик є ключовим фактором процесу прикочування. Отже, оптимізуючи конструкцію робочої поверхні котка, можна значно впливати на якість ущільнення, забезпечуючи рівномірність його виконання як по ширині, так і по глибині робочої зони.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є покращення рівномірності ущільнення ґрунту по ширині захвату котка для ущільнення свіже підготовленого ґрунту на максимальну глибину шляхом обґрунтування конструкції його робочої поверхні.

Для досягнення мети, вирішувались наступні задачі:

провести аналіз сучасних конструкцій котків для ущільнення свіже підготовленого ґрунту з метою визначення їх переваг і недоліків при виконанні технологічного процесу ущільнення ґрунту;

на основі визначених недоліків в роботі котків для ущільнення свіже підготовленого ґрунту розробити удосконалену конструкцію котка;

розробити математичну модель процесу роботи удосконаленого котка та встановити в загальному вигляді характер розподілення тиску під його робочою поверхнею.

Викладення основного матеріалу. Аналіз роботи сучасних конструкцій котків для ущільнення свіже підготовленого ґрунту засвідчив, що якість виконання технологічного процесу значною мірою залежить як від конструктивних особливостей самого вальця, так і від геометричної форми кулачків. Основними недоліками наявних робочих органів є нерівномірний розподіл величини ущільнення по ширині захвату котка, а також небажане розпушування ґрунту кулачками, зумовлене їхньою будовою. Отже, необхідно проводити подальші дослідження, спрямовані на обґрунтування оптимальної форми робочих поверхонь ґрунтових котків.

Для усунення вказаних недоліків запропонована наступна конструкція котка для ущільнення свіже підготовленого ґрунту рис. 1.

Коток для ущільнення свіже підготовленого ґрунту, має зовнішню циліндричну поверхню в якій виконані пази які утворюють при розгортці бічного профілю котка поверхню в якій границі пазу представляються у вигляді двох гармонійних періодичних кривих зсунутих одна відносно одної на півперіоду вздовж напрямку розгортки та їх особистого напрямку, при цьому в вертикальній площині перпендикулярній до напрямку розгортки паз являє собою половину еліпсу, а у повздовжній площині паз представляє собою гармонійну періодичну криву з періодом рівним періоду кривих меж пазу в розгортці, та може містити прямолінійний зріз, ланку у вигляді відрізка паралельного напрямку розгортки, обумовлений формою пазу при виході за розміри котка.

Як видно з рис. 1, запропонований коток для ущільнення свіже підготовленого ґрунту складається із зовнішньої циліндричної поверхні 1, пазів 2, боковин 3.

Робочий процес із запропонованим котком відбувається таким чином: в процесі роботи зовнішня циліндрична поверхня котка 1 за рахунок своєї товщини занурюючись в ґрунт направляє його в пази 2. Конструкція пазів 2 сприяє ущільненню ґрунту з усіх боків і після проходження котка формується хвилеподібна поверхня майданчика для майбутнього будівництва. При роботі котка формується рівномірно ущільнений як верхній так і нижній шар ґрунту без їх руйнування. Зміщення відносно одна одної кривих які утворюють поверхні сусідніх пазів дає можливість плавно розподіляти

навантаження на коток забезпечуючи рівномірну щільність по всій ширині його захвату. За рахунок конструкції робочої поверхні котка та конструкції пазів забезпечується рівномірне ущільнення ґрунту по ширині його захвату на максимальну глибину, а для забезпечення необхідної рівномірності ущільнення потрібна менша кількість проходів.

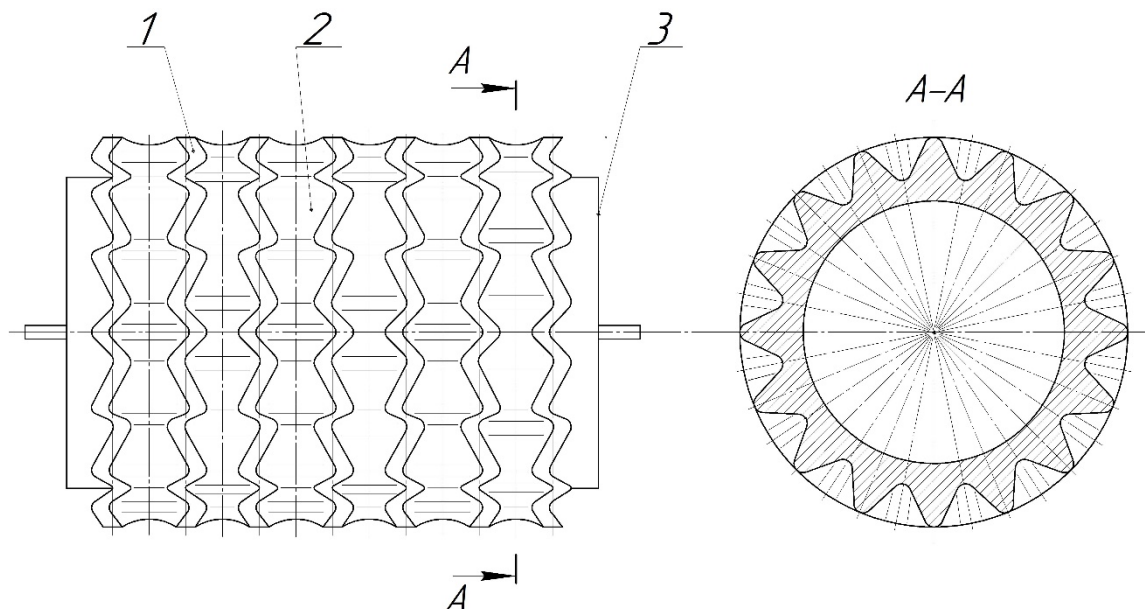


Рисунок 1 – Ущільнюючий коток для свіже підготовленого ґрунту

Джерело: розроблено авторами

Проведений аналіз конструкцій котків для ущільнення свіже підготовленого ґрунту показав, що подальшим перспективним напрямом удосконалення їх робочих елементів є використання комбінованих поверхонь складних геометричних форм. Метою комбінування, використання складних форм котків є намагання використати переваги та усунення, зменшення недоліків які притаманні різним їх типам. В основному у найпоширеніших видах будівельних котків використані дві форми складових - гладковальцева та кулачкова (кулькова).

Гладковальцева складова являє собою ту область котка де безпосередньо бічний профіль котка є зовнішньою поверхнею циліндра. Оскільки границі області кулачкової складової описані за допомогою розгортки бічного профілю котка де її межі являють собою дві гармонійні періодичні криві зсунуті одна відносно одної на пів періоду вздовж напрямку розгортки S та їх особистого напрямку то враховуючи умову постійного (незмінного тиску) гладковальцевої частини котка на поверхні ґрунту, що ущільнюється в залежності від кута повороту котка можна визначити період гармонійних кривих. Він повинен вміщувати цілочислену кількість разів в одне обертання котка (довжину кола по перерізу циліндру котка).

Розглянемо процес ущільнення ґрунту гладковальцевою складовою котка склавши схему рис.2.

Прийmemo наступні позначення:

- A - глибина ущільнення;
- $h + \Delta h$ - глибина деформації ґрунту при роботі котка;
- h - глибина деформації ґрунту після проходження котка;
- R - радіус гладковальцевої складової котка;

T - період гармонійних кривих якими описують межу гладковальцевої складової;

φ - кут сектора дії котка (миттєвий сектор робочої області гладковальцевої складової котка):

$$\varphi = 2 \cdot \arccos\left(\frac{R - \Delta h}{R}\right). \quad (1)$$

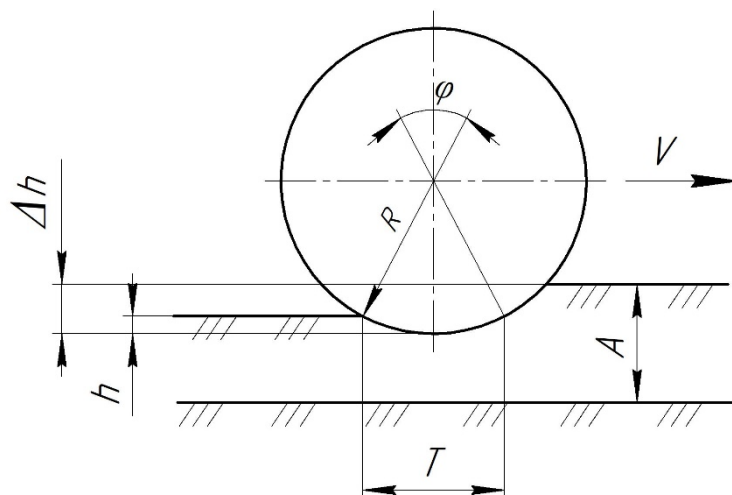


Рисунок 2 – Схема деформації ґрунту гладковальцевою складовою котка в процесі його ущільнення
Джерело: розроблено авторами

Розрахуємо кількість періодів вкладених в повний оберт котка:

$$n = \frac{2\pi}{2 \cdot \arccos\left(\frac{R - \Delta h}{R}\right)} = \frac{\pi}{\arccos\left(\frac{R - \Delta h}{R}\right)}. \quad (2)$$

Найменша кількість періодів вкладених в один оберт котка (повинна бути округлена до більшого):

$$N \approx n_+.$$

Тоді період:

$$T = R \cdot \frac{2\pi}{N} = \frac{2\pi R}{\left(\frac{\pi}{\arccos\left(\frac{R - \Delta h}{R}\right)}\right)_+}. \quad (3)$$

У нашому випадку кулачковою складовою котка є пази які виконані на поверхні циліндра тому їх дія в залежності від кута повороту котка має бути найбільш рівномірною. Тоді кількість пазів K в такому випадку повинна бути парною.

Представивши контактний (опорний) тиск P_K , як:

$$P_K = \frac{G}{F}, \quad (4)$$

де G - сила тяжіння: $G = mg$;

F - приведена площа опорної поверхні,

$$F = (K + 1) \cdot \left(\sqrt{2R \cdot \Delta h - \Delta h^2} \cdot b\right). \quad (5)$$

Розрахуємо робочу ширину міжпазової складової гладковальцевої частини котка (міжпазову відстань – між межами сусідніх пазів) b :

$$b = \frac{mg}{P_K \cdot (K+1) \cdot \sqrt{2R \cdot \Delta h - \Delta h^2}}. \quad (6)$$

Визначимо величину відстані між центрами пазів (рис.3):

$$l = \frac{L_k}{K+1}, \quad (7)$$

де L_k - ширина робочої поверхні котка по ширині розгортки L .

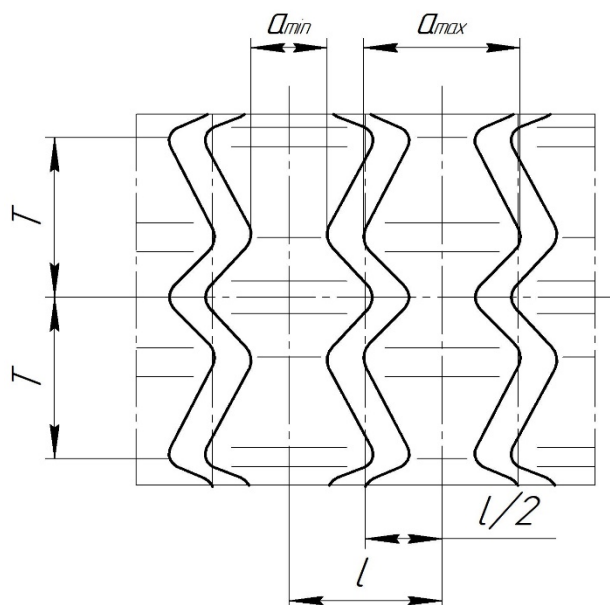


Рисунок 3 – Схема для визначення величин елементів поверхні котка

Джерело: розроблено авторами

Прийнявши за умову постійності форми пазу, який утворює поперечному перерізі до напрямку розгортки профіля котка півеліпс, ширина пазу в областях його максимального звуження та розширення:

$$a_{\min} = \frac{2 \cdot h_0}{k_e}; \quad (8)$$

$$a_{\max} = 2 \cdot l - 2 \cdot b - \frac{2 \cdot h_0}{k_e}, \quad (9)$$

де h_0 - базова глибина пазу (глибина в середині області максимального звуження пазу, вибирається в залежності від типу котка за навантаженням і може бути для легких, середніх і важких, згідно [21], відповідно $h_0 = 4 - 6 \text{ см}$; $h_0 = 6 - 10 \text{ см}$; $h_0 = 10 - 15 \text{ см}$);

k_e - еліптичність пазу (конструктивний параметр, яким задається форма пазу).

Глибина в середині області максимального розширення пазу:

$$h_{\max} = l \cdot k_e - b \cdot k_e - h_0 \quad (10)$$

Маючи розрахункові параметри котка та визначені умови роботи можемо побудувати поверхню відтиску після його проходу.

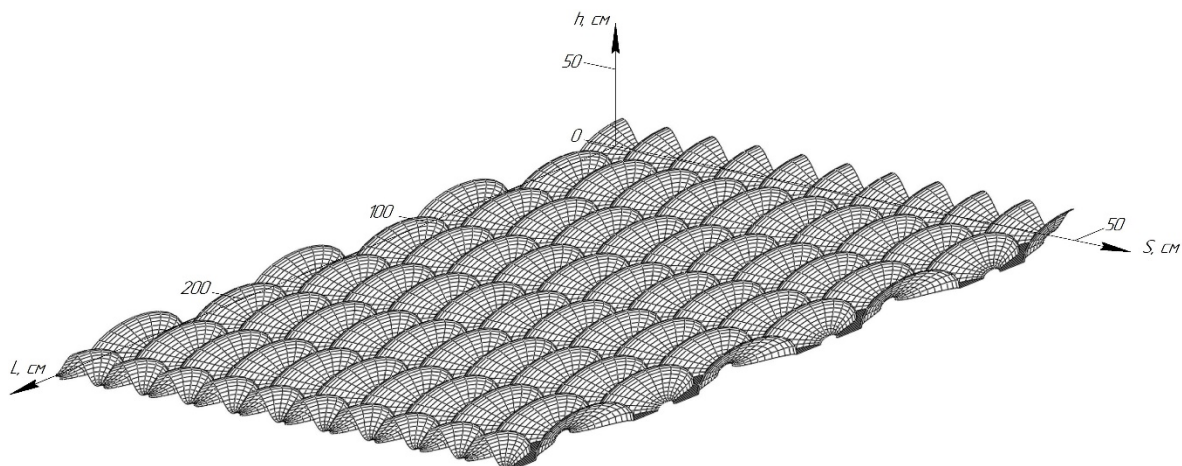


Рисунок 4 – Поверхня відтиску після проходу котка

Джерело: розроблено авторами

Як видно із отриманого, за умови розрахунку середнього за контактним тиском котка масою в 9 тон шириною робочої області котка в 3 м діаметром котка 1,4 м при шести пазах з еліптичністю 0,9 мінімальна та максимальна ширина пазу становитиме 0,1778 м та 0,5018 м, глибини пазів у відповідних місцях складатимуть 0,8 м та 0,2258 м, відстань між серединами (центрами) 0,4286 м, по циліндру котка вміститься 93 періоди. Таким чином наведена методика дозволяє розрахувати геометричні параметри котка для ущільнення свіже підготовленого ґрунту з врахуванням всього діапазону силового навантаження при проведенні операції ущільнення ґрунту під майбутній будівельний майданчик.

Висновки.

1. Аналіз виконання технологічного процесу сучасних котків для ущільнення свіже підготовленого ґрунту показав, що їх конструктивні особливості не забезпечують оптимального рівня щільності ґрунту по всій ширині та глибині захвату при мінімальній кількості проходів. У зв'язку з цим було запропоновано удосконалену конструкцію ґрунтового котка, а також розроблено математичну модель, що описує його роботу.

2. Запропонована математична модель вдосконаленого котка для ущільнення свіже підготовленого ґрунту дає змогу визначити розподіл питомого тиску залежно від конструктивних особливостей його елементів та фізико-механічних властивостей ґрунту.

3. Підвищена ефективність запропонованої конструкції котка досягається завдяки особливостям його робочої поверхні, які сприяють рівномірному ущільненню ґрунту по всій ширині захвату на максимальну глибину. Це дозволяє скоротити кількість проходів, необхідних для досягнення необхідної рівномірності ущільнення.

Список літератури

1. Лівінський О. М., Пшінько О. М., Савицький М. В., Курок О. І. та ін. Будівельні машини та обладнання : підручник. Київ : Українська академія наук ; МП Леся, 2015. 280 с.
2. Сукач М. К. Будівельні машини і обладнання : підручник. Київ : Ліра-К, 2016. 158 с.
3. Фомін А. В., Костенюк О. О., Тетерятник О. А., Боковня Г. І. Машини і обладнання для будівництва, утримання і ремонту доріг : навч. посіб. Київ : КНУБА, 2005. 125 с.
4. Кузенко Л. М., Кузенко Д. В., Вантух З. З., Панюра Я. Й. Дорожньо-будівельні машини : навч. посіб. Київ : Кондор, 2021. 236 с.
5. Баладінський В. Л., Назаренко І. І., Онищенко О. Г. Будівельна техніка. Київ, 2002. 462 с.

6. ДБН В.1.2-5:2007. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. Київ : Мінрегіонбуд України, 2007. 13 с.
7. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти будинків і споруд. Основні положення проектування : зі змінами № 1 і № 2. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. 161 с.
8. ДБН В.2.3-4:2015. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Київ : Мінрегіонбуд України, 2015. 91 с.
9. Кушнарьов А. С., Кочев В. І. Механіко-технологічні основи обробітку ґрунту. Київ : Урожай, 1989. 144 с.
10. Лютенко В. Є. Технічні засоби і методи підвищення ефективності ущільнення дорожніх покриттів котками на пневматичних шинах. Технології та механізація дорожньо-будівельних робіт. 2022. Вип. 31. С. 34–39.
11. Розвиток технологій дорожнього будівництва: сучасні тенденції / за ред. В. П. Мельника. Київ : НТУ, 2015. 256 с.
12. Трофименко М. С., Григорович О. В. Дорожні катки та їх застосування в Україні. Транспортні системи України. 2018. № 5. С. 27–33.
13. Хмара Л. А., Кравець С. В., Скоблюк М. П. та ін. Машина для земляних робіт : підручник / за заг. ред. Л. А. Хмари, С. В. Кравця. Харків : Фавор, 2014. 548 с.
14. Трофимов А. В., Іванченко О. В. Сучасні тенденції у виробництві дорожніх котків. Дорожні машини і механізми. 2016. № 4. С. 12–18.
15. Патент № 108147 Україна, МПК E01C 19/28 (2006.01). Ущільнюючий коток / Д. Ю. Артеменко, В. А. Настоящий, О. М. Антонюк. № u201511733 ; заявл. 27.11.2015 ; опубл. 11.07.2016, Бюл. № 13. 3 с.
16. Патент № 116937 Україна, МПК E01C 19/28 (2006.01). Ущільнюючий коток / Д. Ю. Артеменко, В. А. Настоящий, С. А. Мартиненко, О. М. Соколов, К. М. Процик. № u201712819 ; заявл. 22.12.2017 ; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10.
17. Патент № 133947 Україна, МПК E01C 19/28 (2006.01). Ущільнюючий коток / Д. Ю. Артеменко, В. А. Настоящий, В. В. Дарієнко, А. А. Тихий, О. О. Дарієнко. № u201811821 ; заявл. 16.11.2018 ; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8.
18. Литвиненко Т. В. Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11. Полтава : ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2016. 210 с.
19. Зоценко М. Л., Коваленко В. І., Хілобок В. Г., Яковлев А. В. Інженерна геологія : механіка ґрунтів, основи і фундаменти : підручник. Київ : Вища школа, 1992. 408 с.
20. Артеменко Д. Ю., Онопа В. А., Кислун О. А., Муленко К. А. Теоретичне обґрунтування конструктивних особливостей котка для передпопівного обробітку ґрунту. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2023. Вип. 53. С. 3–15.
21. Автомобільні дороги : будівництво, ремонт, машини і механізми для виконання робіт : навч. посіб. : у 2 ч. Ч. 1 / Л. А. Хмара та ін. Київ ; Дніпропетровськ : НТУ–ПДАБА, 2011. 416 с.

References

1. Livinskyi, O.M., Pshinko, O.M., Savytskyi, M.V., Kurok, O.I., et al. (2015). *Budivel'ni mashyny ta obladnannia: pidruchnyk*. Kyiv: Ukrain's'ka akademiia nauk; MP Lesia [in Ukrainian].
2. Sukach, M.K. (2016). *Budivel'ni mashyny i obladnannia: pidruchnyk*. Kyiv: Lira-K [in Ukrainian].
3. Fomin, A.V., Kostenyuk, O.O., Teteriatnyk, O.A., Bokovnia, H.I. (2005). *Mashyny i obladnannia dlia budivnytstva, utrymannia i remontu dorih: navch. posib*. Kyiv: KNUBA [in Ukrainian].
4. Kuzenko, L.M., Kuzenko, D.V., Vantukh, Z.Z., Paniura, Ya.Yi. (2021). *Dorozhn'o-budivel'ni mashyny: navch. posib*. Kyiv: Kondor [in Ukrainian].
5. Baladynskyi, V.L., Nazarenko, I.I., Onyshchenko, O.H. (2002). *Budivel'na tekhnika*. Kyiv [in Ukrainian].
6. DBN V.1.2-5:2007. (2007). *Naukovo-tekhnichnyi suprovid budivel'nykh ob'iektiv*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
7. DBN V.2.1-10:2009. (2012). *Osnovy ta fundamenti budynkiv i sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia: zi zminamy № 1 i № 2*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
8. DBN V.2.3-4:2015. (2015). *Sporudy transportu. Avtomobil'ni dorohy*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
9. Kushnarov, A.S., Kochev, V.I. (1989). *Mekhaniko-tekhnologichni osnovy obrobittu gruntu*. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].
10. Liutenko, V.Ye. (2022). Tekhnichni zasoby i metody pidvyshchennia efektyvnosti ushchil'nennia dorozhnikh pokryttiv kotkami na pnevmatichnykh shynakh. *Tekhnologii ta mekhanizatsiia dorozhn'o-budivel'nykh robot*, (31), 34–39 [in Ukrainian].
11. Mel'nyk, V.P. (Ed.). (2015). *Rozvytok tekhnologii dorozhnoho budivnytstva: suchasni tendentsii*. Kyiv: NTU [in Ukrainian].

12. Trofymenko, M.S., Hryhorovych, O.V. (2018). Dorozhni katky ta yikh zastosuvannya v Ukraini. *Transportni systemy Ukrainy*, (5), 27–33 [in Ukrainian].
13. Khmara, L.A., Kravets', S.V., Skobliuk, M.P., et al. (2014). *Mashyny dlia zemlianykh robot: pidruchnyk*. L.A. Khmara, S.V. Kravets' (Eds.). Kharkiv: Favor [in Ukrainian].
14. Trofimov, A.V., Ivanchenko, O.V. (2016). Suchasni tendentsii u vyrobnytstvi dorozhnikh kotkiv. *Dorozhni mashyny i mekhanizmy*, (4), 12–18 [in Ukrainian].
15. Artemenko, D.Yu., Nastoiashchy, V.A., Antonyuk, O.M. (2016). Ushchil'niuiuchy kotok. Patent No. 108147, Ukraine. Bulletin No. 13, July 11 [in Ukrainian].
16. Artemenko, D.Yu., Nastoiashchy, V.A., Martynenko, S.A., Sokolov, O.M., Protsyk, K.M. (2018). Ushchil'niuiuchy kotok. Patent No. 116937, Ukraine. Bulletin No. 10, May 25 [in Ukrainian].
17. Artemenko, D.Yu., Nastoiashchy, V.A., Dariienko, V.V., Tykhyi, A.A., Dariienko, O.O. (2019). Ushchil'niuiuchy kotok. Patent No. 133947, Ukraine. Bulletin No. 8, April 25 [in Ukrainian].
18. Lytvynenko, T.V. (2016). *Ushchil'nennia gruntiv dorozhnogo nasypu za umovy zabezpechennia yikh tryvaloi mitsnosti: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.11*. Poltava: PNTU im. Yu. Kondratiuka [in Ukrainian].
19. Zotsenko, M.L., Kovalenko, V.I., Khilobok, V.H., Yakovlev, A.V. (1992). *Inzhenerna heolohiia: mekhanika gruntiv, osnovy i fundamente: pidruchnyk*. Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].
20. Artemenko, D.Yu., Onopa, V.A., Kyslun, O.A., Mulyenko, K.A. (2023). Teoretychne obgruntuvannia konstruktyvnykh osoblyvostei kotka dlia peredposivnogo obrobittu gruntu. *Konstruivannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn*, (53), 3–15 [in Ukrainian].
21. Khmara, L.A., et al. (2011). *Avtomobil'ni dorohy: budivnytstvo, remont, mashyny i mekhanizmy dlia vykonannia robot: navch. posib. u 2 ch. Ch. 1*. Kyiv; Dnipro: NTU–PDABA [in Ukrainian].

**Vladyslav Nastoiashchy, Prof., PhD tech. sci., Dmytro Artemenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Oleh Kyslun, Assoc. Prof., PhD tech. Sci, Viktor Dariienko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Ivan Skrynnik, Assoc. Prof., PhD tech. sci.**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Rationale for the Design of a Roller for Compacting Freshly Prepared Soil on a Site for Future Construction

The paper shows the results of exploratory scientific and theoretical research into the design features of a roller for compacting freshly prepared soil at a site for future construction. During the analysis of the designs of existing rollers, it was found that they do not fully meet the requirements for uniform soil compaction along the depth and width of the working part of the roller. It was found that the uniformity of soil compaction can be significantly affected by the configuration of the outer working surface of the roller in the plane of movement. Therefore, optimizing the design of the working surface of the roller will significantly affect the quality of compaction, and further development of new designs of the working surfaces of rollers for soil compaction is an urgent task.

The analysis of the designs of rollers for compacting freshly prepared soil showed that a further promising direction for improving their working elements is the use of combined surfaces of complex geometric shapes. The purpose of combining, using complex forms of rollers is to try to use the advantages and eliminate, reduce the disadvantages inherent in their different types. For this purpose, a new roller was proposed, designed for high-quality compaction of freshly prepared soil to the maximum depth in the minimum number of passes. The compacting roller has an outer cylindrical surface in which grooves of a complex geometric profile are made in the form of two harmonic periodic curves, which make it possible to smoothly distribute the load from the roller's action on the soil.

Using mathematical modeling, the process of interaction of the roller with the soil environment was studied. It was determined that the main factors influencing the compaction process are the design of the working part and the physical and mechanical properties of the soil. It was established that the nature of the distribution of specific pressure under the working surface of the roller corresponds to its design features. The effectiveness of the proposed design of the roller for compacting freshly prepared soil is ensured by the fact that the design of its working surface allows for uniform compaction of the soil across the width of the roller's grip to the maximum depth and reduces the number of roller passes to ensure the required uniformity of compaction.

soil compaction, soil roller, working surface of the roller, mathematical model of the interaction of the roller with the soil

Одержано (Received) 28.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 14.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025

УДК 624.072.33:624.014.2:519.6 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.241-249](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.241-249)

Г. Д. Портнов¹, доц., канд. техн. наук, В. В. Дарієнко¹, доц., канд. техн. наук,
В. В. Пукалов¹, доц., канд. техн. наук, В. В. Яцун¹, проф., канд. техн. наук
С. А. Гудзь², доц., канд. техн. наук

¹Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

²ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна

e-mail: budkom999@gmail.com, goods_s_a@pstu.edu

Модернізація сталевих ферм із труб квадратного та прямокутного перерізу

Проаналізовано напружено-деформований стану вузлів кроквяних ферм із гнutoзварних профілів прямокутного перерізу (ГЗП) та способів підвищення їх несучої здатності. Визначено, що низький коефіцієнт використання матеріалу в серійних конструкціях обумовлений нерівномірним розподілом напружень у зонах сполучення поясів і решітки. Для зниження концентрації напружень запропоновано введення проміжних елементів. Обґрунтування конструктивних рішень виконано за допомогою методу скінченних елементів у комбінації зі спеціалізованим програмним комплексом IDEA StatiCa. На прикладі розрахунку вузла ферми доведено, що впровадження локального підсилення дозволяє збільшити несучу здатність конструкції у 1,45 рази без зміни її геометрії. Результати підкреслюють ефективність використання сучасних інструментів моделювання для оптимізації сталевих покриттів.

ферма, гнutoзварні профілі прямокутного перерізу, метод скінченних елементів, компонентний метод

Постановка проблеми. Системи покриттів на основі гнutoзварних профілів прямокутного перерізу (ГЗП) набули широкого застосування в цивільному та промисловому будівництві завдяки оптимальному співвідношенню радіусів інерції та здатності елементів добре чинити опір крученню та вигину. Однак аналіз напружено-деформованого стану (НДС) таких конструкцій показав низький коефіцієнт використання міцності сталі ($K_b \approx 30\text{--}50\%$) через концентрацію напружень у вузлах з'єднань. Це призводить до втрати місцевої стійкості тонких стінок і зниження несучої здатності конструкції в цілому [1, 5, 17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Причиною неефективного використання сталі є те, що збільшення локальних напружень у місцях сполучення стрижневих елементів ГЗП призводить до порушення місцевої стійкості тонких стінок профілю щодо розвитку НДС, що визначає загальну міцність стрижня [7, 9, 18].

Зниження локальних напружень можливо досягти шляхом уведення у вузол спряження додаткових проміжних елементів. Обґрунтування параметрів такого конструктивного вирішення вузлів пов'язано з труднощами розрахунку [6, 8].

Внутрішні зусилля у стрижнях, переміщення вузлів та елементів ферм визначаються переважно за допомогою різноманітних програмних комплексів (ПК), що реалізують метод скінченних елементів (МСЕ): ЛІРА-САПР, Autodesk Robot Structural Analysis Professional, Dlubal RFEM, Tekla Structural Designer, CSI SAP2000, Bentley RAM тощо.

Впровадження у практику розрахунку ферм тривимірного моделювання має передбачати у кожному конкретному випадку всебічний аналіз способів поєднання тонкостінних оболонок труби у вузлі і широке використання результатів трудомістких експериментальних досліджень [6, 9, 12].

Нормативні документи регламентують розрахунок стандартних вузлів, реалізований у СТК-САПР (ЛІРА-САПР) [10], Autodesk Robot Structural Analysis Professional та ін.

При цьому, зазвичай, не враховується нелінійна робота матеріалу, пов'язана з появою локальних пластичних деформацій, що призводить до зниження граничного навантаження, яке може бути сприйняте вузлом.

Розрахунок нестандартних вузлів вимагає створення моделі, що описує поведінку вузла у складі конструкції. Застосування методу скінченних елементів, реалізованого у вище згаданих розрахункових комплексах, не виправдовує себе в інженерних розрахунках. Балкова модель лінійно-протяжної конструкції не дозволяє достатньо детально визначити НДС ділянки моделі поза межами дії гіпотези плоских перерізів. Розгляд твердотільної моделі призводить до виникнення проблем, пов'язаних з сингулярністю [6].

В даний час для розрахунку з'єднань сталевих конструкцій у європейських нормативних документах (EN 1993-1-8-2009) застосовується компонентний метод (КМ), при якому вузол розглядається як сукупність пов'язаних один з одним компонентів. Для заданого вузла будується розрахункова модель, що складається з пружних в'язей та стрижневих елементів, що сприймають деформацію. Це значно полегшує процес розрахунку типових вузлів. Основний недолік методу – обмеження при розрахунку вузлів довільної форми, пов'язані з відсутністю прототипу моделі.

Постановка завдання. Таким чином метою дослідження є підвищення рівномірності розподілу напружень у вузлових з'єднаннях ферми з квадратних та прямокутних сталевих труб та збільшення її несучої здатності шляхом оптимізації конструктивних рішень із застосуванням сучасних чисельних методів розрахунку.

Для досягнення мети нами було поставлено та вирішено низку наступних задач:

- провести аналіз сучасних конструкцій ферми з квадратних та прямокутних сталевих труб з метою визначення їх переваг і недоліків при формуванні напружено-деформованого стану вузлових з'єднань;
- визначити основні фактори, що спричиняють нерівномірний розподіл напружень, зокрема концентрацію локальних напружень, що знижує коефіцієнт використання міцності сталі;
- розробити оптимальне конструктивне рішення із застосуванням підсилювальних елементів (наприклад, зміцнювальних пластин) для зменшення концентрації напружень без зміни геометричних параметрів ферми;
- провести розрахунок вузлових з'єднань із застосуванням методу скінченних елементів у спеціалізованому програмному комплексі IDEA StatiCa з метою обґрунтування ефективності запропонованих рішень та підвищення несучої здатності конструкції.

Виклад основного матеріалу. Розроблений на основі поєднання підходів МСЕ та КМ спеціалізований розрахунковий комплекс IDEA StatiCa [16], призначений для аналізу та розрахунку вузлів сполучення елементів несучих конструкцій, дозволяє моделювати нестандартні вузли з автоматичним обчисленням жорсткості окремих компонентів.

Спільне залучення до розрахунку ферм згаданих ПК дозволить створити на основі серійних конструкцій прототип із вирівняними показниками несучої здатності вузлів та елементів. Така конструкція матиме підвищену несучу здатність при збереженні геометричних і вагових характеристик без істотної зміни технології виготовлення.

Нижче наведено результати модернізації кроквяної ферми, розробленої на основі типових принципових рішень альбому Асоціації «Український центр сталевого будівництва» [11]. Схему такої ферми зображено на рис. 1.

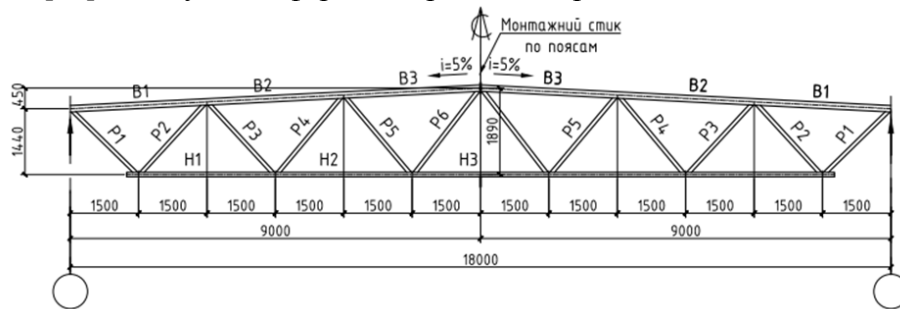


Рисунок 1 – Схема ферми відповідно до альбому [11]

Джерело: розроблено на підставі [11]

По верхньому поясу кроквяних ферм передбачено влаштування прогонів покриття з кроком 3 м (у вузлах ферм) із швелерів.

Нижній пояс кроквяних ферми розв'язаний з площини двома лініями розпірок.

При створенні розрахункової схеми враховувалося розцентрування осей елементів решітки і поясу (зазор між суміжними стінками розкосів 20 мм).

Ескізу проробку вузлів ферми, що модернізується, представлено на рис. 2.

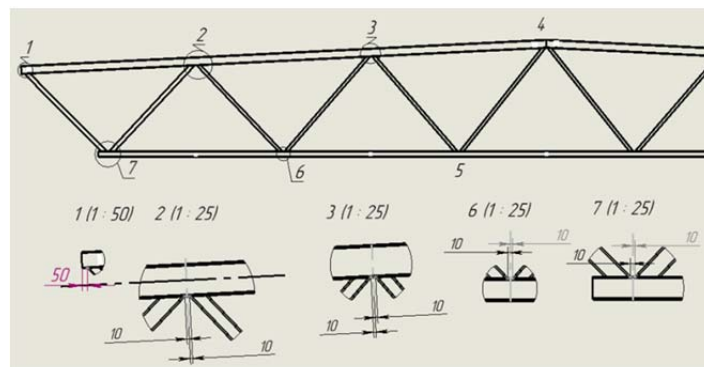


Рисунок 2 – Вузли половини симетричної ферми [1...7]

Джерело: розроблено авторами.

Характеристики елементів ферми (рис. 1, рис. 2) представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики елементів ферми

Елементи ферми	Позначення елементів	Переріз	Сталь
Верхній пояс	B1	140x100x4	С345
	B2		
	B3		
Нижній пояс	H1	100x4	С345
	H2		
	H3		
Розкоси	P1	80x4	С345
	P2		
	P3	60x4	С255
	P4		
	P5		
	P6		

*Матеріал елементів прийнято згідно з вимогами [4].

Джерело: розроблено авторами.

Розрахункову схему ферми прийнято у вигляді плоскої розкріпленої у вертикальній площині системи (тип схеми 2 – «Плоска рама»). Розрахунок виконаний з урахуванням жорсткості вузлових з'єднань та вигину елементів у площині ферми [3].

У розрахунковій схемі спирання ферми прийнято шарнірним, одна з опор шарнірно нерухома, а інша – шарнірно рухома.

Розглядалася одна схема застосування однакових зосереджених навантажень F до вузлів ферми (рис. 3). Значення $F = 3330$ Н підібрано таким чином, щоб забезпечити значення коефіцієнта використання матеріалу $K_v \approx 100\%$ у проміжних перерізах найбільш напруженого елемента ферми (Н3, рис. 1). Власна вага ферми враховувалася програмним засобом.

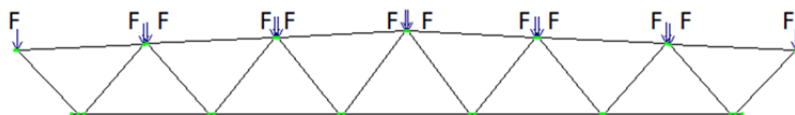


Рисунок 3 – Схема вузлових навантажень

Джерело: розроблено авторами.

Розрахунок зусиль у стрижнях ферми, оцінку їх напруженого стану у проміжних перерізах та вузлах було виконано у ПК ЛІРА-САПР з використанням підпрограми СТК-САПР у локальному режимі. Усі розрахунки проводилися у припущенні повного провару зварних з'єднань.

На діаграмі (рис. 4) представлено результати розрахунку відсоткового використання матеріалу порівняно з граничною величиною напруження для пружної роботи сталі (коефіцієнт використання K_v).

Повністю використовується міцність матеріалу нижнього поясу поза вузлами примикання елементів (стрижень Н1; $K_v = 100\%$). У вузлах 2, 3, 6, 7 матеріал поясів суттєво перенапружений. Фактично несуча здатність ферми може бути забезпечена при зниженні вузлового навантаження в 1,45 рази (критичним елементом є вузол 6).

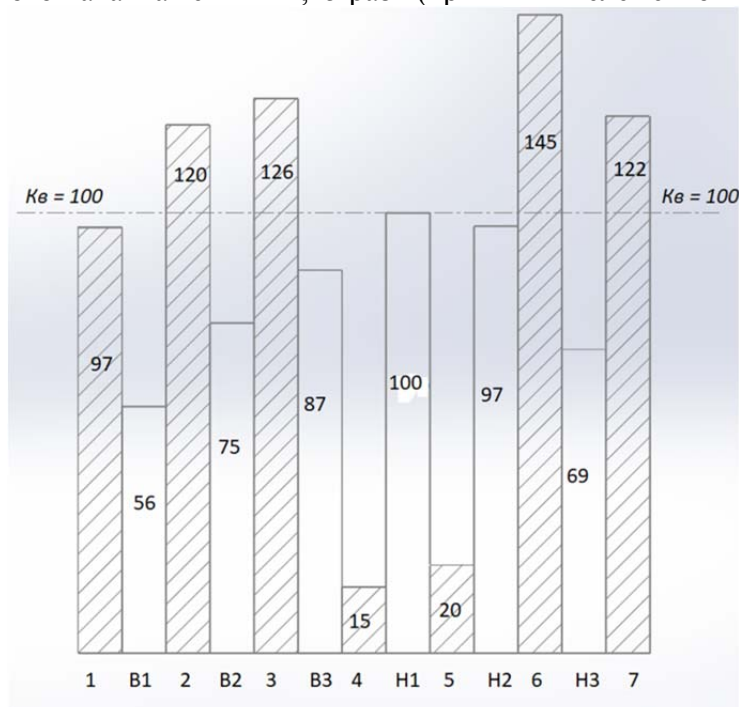


Рисунок 4 – Діаграма значень коефіцієнта використання матеріалу в елементах ферми
1 ... 7 – позначення вузлів (рис. 2) B1 ... H3 – позначення стержнів (рис. 1)

Джерело: розроблено авторами.

Трасування розрахунку показує значне перенапруження верхньої полиці поясу в місцях примикання елементів решітки, що виникає внаслідок локального продавлювання. Це може спричинити розвиток пластичних деформацій, що, у свою чергу, впливає на загальну несучу здатність конструкції.

Формульне уявлення процесів, які відбуваються у вузлі, є складним та багатофакторним, що значно ускладнює прийняття обґрунтованих конструкторських рішень щодо підвищення його несучої здатності. Врахування нелінійних ефектів, зокрема пластичних деформацій, зміни геометричних характеристик і впливу вторинних напружень, є вкрай необхідним для точного аналізу роботи вузла.

Одним із поширених підходів до підвищення міцності вузлів є введення додаткових елементів, таких як ребра жорсткості, накладки або посилені з'єднувальні пластини. Однак застосування таких рішень стримується недосконалістю існуючих методик розрахунку, які не завжди враховують всі особливості реальної роботи вузлів, а також недостатністю експериментальних даних для коригування розрахункових моделей.

ПК IDEA StatiCa дозволяє обґрунтувати конструктивні параметри елементів, що підсилюють вузол, зокрема, провести розрахунок вузла з урахуванням фізичної нелінійності роботи матеріалу; отримати зображення вузла в деформованому вигляді з ізополями напружень, зонами пластичних деформацій, визначити елементи вузла із зонами пластичності; здійснити розрахунок граничної несучої здатності вузла.

На рис. 5 показаний деформований вид вузла 6 (рис.2) та ізополя приведених напружень по Мізесу.

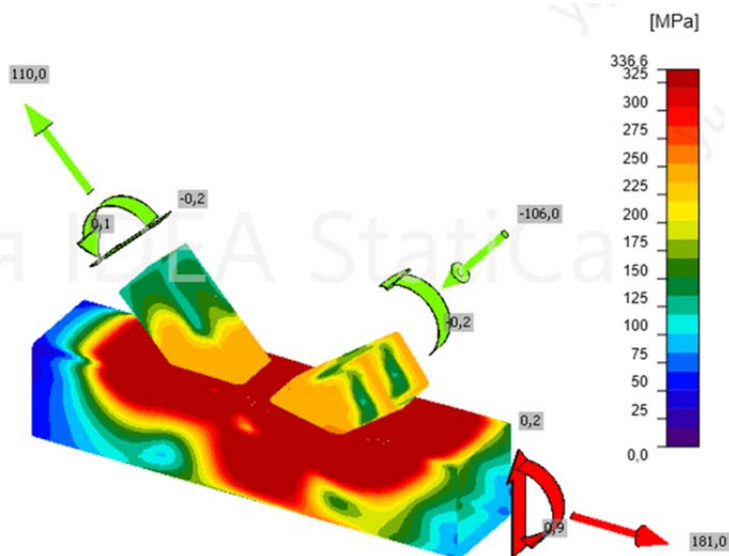


Рисунок 5 – Деформований вид вузла 6 та ізополя приведених напружень по Мізесу
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 6 показано зони пластичності цього вузла.

Найбільш напруженими є ділянки сполучення розкосів з полицею поясу.

Найпростішим рішенням зниження напружень є введення в місце сполучення розкосів і поясу підсилювальної пластини.

На рис. 7 і рис. 8 показано ізополя напружень і зони пластичності вузла 6 з підсилювальною пластинною.

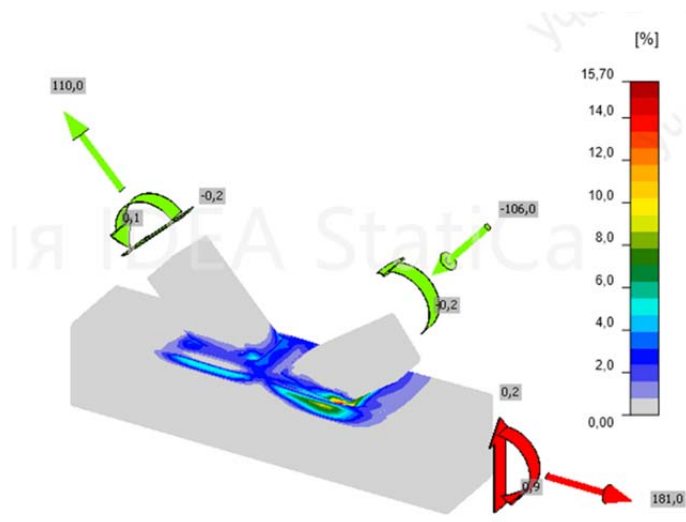


Рисунок 6 – Зони пластичності вузла 6

Джерело: розроблено авторами.

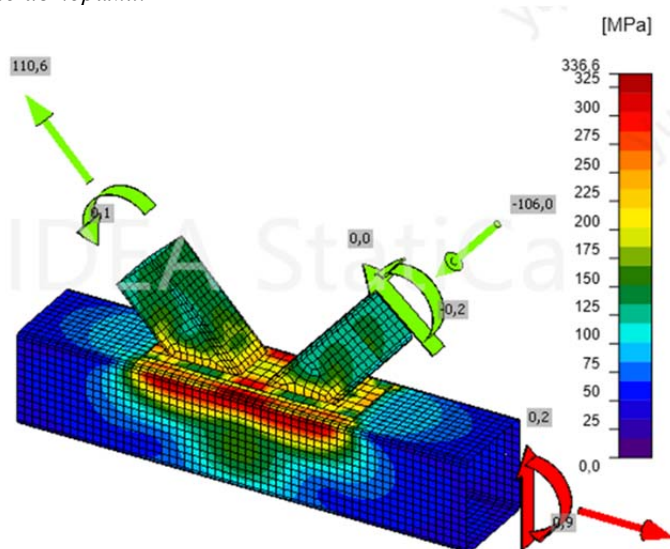
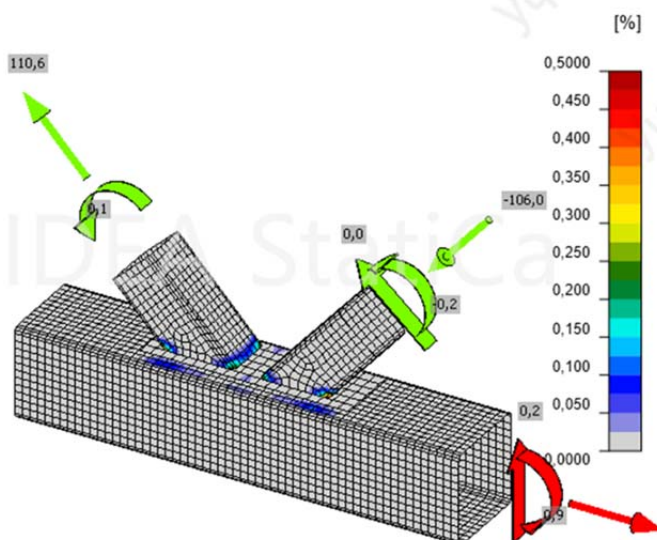
Рисунок 7 – Деформований вид вузла 6 з пластиною та ізополя приведених напружень по Мізесу
Джерело: розроблено авторами.

Рисунок 8 – Зони пластичності вузла 6 з пластиною

Джерело: розроблено авторами.

Введення пластини суттєво змінює напружений стан вузла. Несуча здатність вузла, розрахована з припущенням граничної пластичної деформації 0,05 (EN 1993-1-5-C1.C.8), збільшується зі збільшенням товщини пластини (рис. 9).

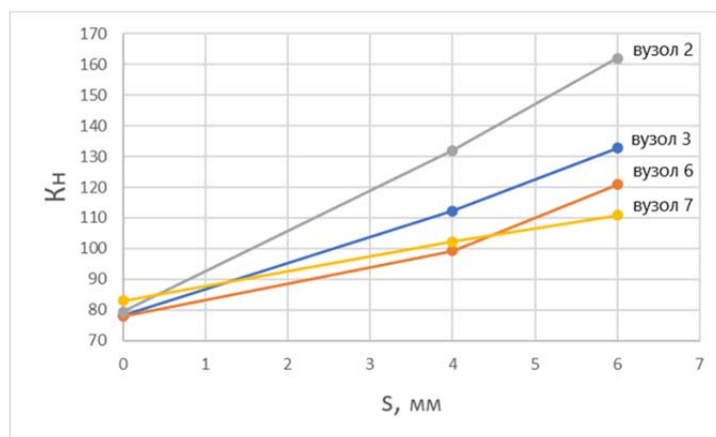


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнта несучої здатності вузла K_H від товщини пластини S
Джерело: розроблено авторами.

Ескізи посилених вузлів ферми, що забезпечують достатню рівномірність її елементів, показано на рис. 10. Розміри пластин вибрано з міркувань зручності зварювальних операцій.

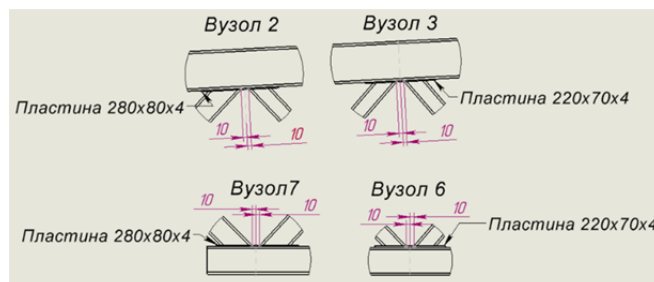


Рисунок 10 – Ескізи посилених вузлів ферми
Джерело: розроблено авторами.

Представлений варіант посилення вузлів забезпечує несучу здатність ферми, що відповідає міцності найбільш напруженої ділянки нижнього поясу.

Висновки. Комплексний аналіз несучої здатності та деформаційної поведінки кроквяної ферми з гнutoзварними прямокутними профілями, виконаний за допомогою сучасних програмних комплексів на основі методу скінченних елементів та спеціалізованого інструментарію IDEA StatiCa, дозволив отримати такі висновки:

1. Безфасонне з'єднання гнutoзварних прямокутних профілів ферми не забезпечує рівномірність її елементів.

2. Несуча здатність такої ферми може бути значно підвищена посиленням критично напружених вузлів.

3. Розрахунок таких вузлів з подальшим обґрунтуванням способів посилення може бути виконаний за допомогою програмних комплексів, побудованих на основі методу скінченних елементів у комбінації зі спеціалізованим комплексом для розрахунку вузлів сполучення елементів несучих конструкцій IDEA StatiCa.

4. Модернізація кроквяної ферми прольотом 18 м шляхом обґрунтованого розрахунку підсилення вузлів дозволяє підвищити її несучу здатність з припущенням граничної пластичної деформації у 1,45 рази без зміни структури та геометричних параметрів.

Список літератури

1. Балук І.М. Оптимальне проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Львів, 2016. 22 с.
2. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд. Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008. 108 с.
3. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Чинний від 2015-01-01. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 199 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-74:2008. Конструкції будинків і споруд. Ферми сталеві кроквяні з гнutoзварних профілів прямокутного перерізу. Чинний від 2010-01-01. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 33 с.
5. Зінкевич О.Г. Рациональное проектирование каркасов малоэтажных зданий и надстроек из легких стальных тонкостенных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Дніпро, 2013. 20 с.
6. Немчинов Ю.І. Метод просторових скінчених елементів (з застосуванням до розрахунку будівель та споруд): монографія. Київ: НДІБК, 1995. 386 с.
7. Пічугін С.Ф., Чичулін В.П. Нові конструктивні системи легких комбінованих ферм. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2015. № 31. С. 486–491.
8. Пічугін С. Ф., Чичулін В. П., Чичуліна К. В. Нові ресурсоекономні конструкції з профільних труб. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2016. № 32. С. 243–248.
9. Пермяков В.О., Гоголь М.В. Рекомендації з проектування раціональних металевих несучих конструкцій перекриття та покриття. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. 24 с.
10. Програмний комплекс Ліра-САПР. Приклади розрахунку і проектування. *Ліраленд*. URL: https://www.liraland.ua/download/private/lira/2023/lira_sapr_examples_ua.pdf (дата звернення: 24.02.2025).
11. Сталеві конструкції покриття. Ферми покриття із квадратних та прямокутних сталевих труб. УЦСБ. URL: https://uscc.ua/uploads/page/images/konceptii/fermy_truby_18-24m.pdf (дата звернення: 24.02.2025).
12. Бабаєв В.М., Бугаєвський С.О., Євель С.М. Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування та зведення конструктивних систем. Київ: Сталь, 2017. 404 с.
13. Чихладзе Е.Д. Удосконалення методів розрахунку і проектування сталебетонних і сталевих конструкцій промислових будівель і споруд. Харків, 2002. 126 с.
14. Frantisek, W. et al. (2019). *Benchmark cases for advanced design of structural steel connections*. Czech Technical University in Prague [in English].
15. CEN – European Committee for Standardisation. EN 1993. (2005) Eurocode 3: *Design of steel structures, Part 1-3: General rules – supplementary rules for coldformed members and sheeting (incorporating CEN corrigendum Nov. 2009)*. Brussels [in English].
16. Idea StatiCa Steel. URL: <https://www.ideastatica.com> (date of access: 24.02.2025) [in English].
17. Steel frame structures. WOLF System. URL: <https://www.wolfssystem.at/en-at/product-lines/industrial-and-commercialconstruction/industrial-construction/steel-frame-structures> (date of access: 06.09.2024) [in English].
18. Pichugin, S.F., Chichulin, V.P., & Chichulina, K.V. (2017). Spatial structures of closed profiles. ACADEMIC JOURNAL series: industrial machine building, civil engineering. Vol. 1. 48. 138–143. URL: <https://doi.org/10.26906/znp.2017.48.787> (date of access: 07.09.2024) [in English].

References

1. Baluk, I.M. (2016). *Optimal design of reconstruction and reinforcement of core metal structures*. Extended abstract of candidate's thesis. Lviv [in Ukrainian].
2. Blikharskyi Z.Ya. (2008). *Reconstruction and reinforcement of buildings and structures*. Lviv [in Ukrainian].
3. DBN. (2014). *Steel Structures*. (ДБН В.2.6-198:2014). Kyiv [in Ukrainian].
4. Derzhstandart Ukrainy. (2008). *Construction of buildings and structures. Steel roof trusses made of rectangular bent-welded profiles*. (ДСТУ Б В.2.6-74:2008). Kyiv [in Ukrainian].
5. Zinkevych, O.H. (2013). *Rational design of frames of low-rise buildings and superstructures made of light steel thin-walled structures*. Extended abstract of candidate's thesis. Dnipro [in Ukrainian].
6. Nemchynov, Yu.I. (1995). *Spatial finite element method (with application to the design of buildings and structures)*. Kyiv: NDIBK [in Ukrainian].
7. Pichuhin, S.F., Chychulin, V.P. (2015). New structural systems for lightweight combined trusses. *Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli ta sporudy*, 31, 486–491 [in Ukrainian].
8. Pichuhin, S.F., Chychulin, V.P., & Chychulina, K.V. (2016). *New resource-saving structures made of shaped tubes*. *Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli ta sporudy*, 32, 243–248 [in Ukrainian].

9. Permiakov, V.O., & Hohol M.V. (2006). *Recommendations for the design of rational metal load-bearing structures to slab and roof*. Lviv [in Ukrainian].
10. Program complex Lira-SAPR. *Examples of calculation and design*. Liraland. https://www.liraland.ua/download/private/lira/2023/lira_sapr_examples_ua.pdf [in Ukrainian].
11. *Steel roof structures. Roof trusses made of square and rectangular steel hollow sections*. USCC. https://uscc.ua/uploads/page/images/koncepcii/fermy_truby_18-24m.pdf [in Ukrainian].
12. Babayev, V.M., Bugayevsky, S.O., & Evel, S.M. (2017). *Numerical and experimental methods of rational design and construction of structural systems*. Kyiv: Stal [in Ukrainian].
13. Chykhlyadze, E.D. (2002). *Improvement of calculation and design methods of steel-concrete and steel structures of industrial buildings and structures*. Kharkiv [in Ukrainian].
14. Frantisek, W. et al. (2019). *Benchmark cases for advanced design of structural steel connections*. Czech Technical University in Prague.
15. CEN – European Committee for Standardisation. EN 1993. (2005) *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules – supplementary rules for coldformed members and sheeting (incorporating CEN corrigendum Nov. 2009)*. Brussels.
16. *Idea StatiCa Steel*. <https://www.ideastatica.com>.
17. *Steel frame structures*. WOLF System. <https://www.wolfssystem.at/en-at/product-lines/industrial-and-commercialconstruction/industrial-construction/steel-frame-structures>.
18. Pichugin, S.F., Chichulin, V.P., & Chichulina, K.V. (2017). Spatial structures of closed profiles. *ACADEMIC JOURNAL series: industrial machine building, civil engineering*. Vol. 1. 48. 138–143. <https://doi.org/10.26906/znp.2017.48.787>.

Hennadii Portnov¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Dariienko**¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

Pukalov Viktor¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Yatsun**¹, Prof., PhD tech. sci.

Serhii Hudz², Assoc. Prof., PhD tech. sci.

¹*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

²*Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine*

Modernization of Steel Trusses Made of Square and Rectangular Hollow Sections

The purpose of this study is to investigate the stress-strain behavior of nodes in purlin trusses fabricated from square and rectangular steel tubes. In modern steel construction, ensuring optimal material utilization and structural reliability is essential. The research aims to identify the causes of uneven stress distribution in conventional truss joints and to explore innovative reinforcement methods. By addressing the low utilization coefficient inherent in standard connections, the study seeks to develop a reinforcement strategy that enhances load-bearing capacity without altering the overall geometry of the structure.

In the presented work, an advanced numerical analysis was carried out using the finite element method in combination with the specialized IDEA StatiCa software. A detailed computational model of the truss nodes was developed to assess the internal force distribution and to pinpoint critical zones where stress concentrations occur. The investigation involved iterative simulations and parametric studies to evaluate the effectiveness of incorporating intermediate reinforcement elements, such as strengthening plates, into the node configurations. The simulation results revealed that conventional unreinforced connections exhibit significant local overstressing, which limits the effective use of steel. In contrast, the introduction of targeted reinforcement produced a more uniform stress distribution and resulted in an increase in the overall load-bearing capacity of the truss system by approximately 1.45 times. The comprehensive analysis confirms that advanced modeling techniques can reliably predict the benefits of design modifications for enhanced structural performance.

The results of this study confirm that the integration of intermediate reinforcement in purlin truss nodes substantially improves structural efficiency and load capacity. The optimized design achieves a more even stress distribution and minimizes the risk of local failures without requiring any changes to the truss geometry. Advanced finite element analysis has proven to be a crucial tool in identifying critical stress zones and guiding effective reinforcement strategies. Consequently, the proposed methodology offers a viable solution for modernizing steel truss systems in both civil and industrial applications, ensuring enhanced safety and material efficiency.

truss modernization, finite element analysis, stress distribution, structural reinforcement

Одержано (Received) 18.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025

УДК 691.88

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.250-255](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.250-255)

І. О. Скриннік, доц., канд. техн. наук, **М. О. Федотова**, канд. техн. наук,
В. В. Дарієнко, доц., канд. техн. наук, **В. В. Яцун**, проф., канд. техн. наук,
Д. Ю. Артеменко, доц. канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький Україна
e-mail: Skrynnik_2002@ukr.net*

Дослідження технологічних рішень при зведенні залізобетонних будівель та споруд в будівництві

У статті висвітлено сучасний стан проблеми та здійснено аналіз конструктивних і організаційно-технологічних рішень, що застосовуються при зведенні полегшених залізобетонних конструкцій. Процес створення ефективних будівельних систем безпосередньо пов'язаний із технологією їх реалізації, оскільки технологічні обмеження нерідко стають ключовим чинником, що впливає на доцільність впровадження тих чи інших інженерних рішень. Одним з таких рішень є застосування вкладок-порожнистих, що не виймаються після тверднення бетону. Такі елементи дають змогу формувати внутрішню геометрію конструкцій, забезпечуючи зменшення матеріаломісткості та вагових характеристик без зниження несучої здатності.

залізобетонні конструкції полегшені, вкладка-порожниста, бетон самоущільнювальний, технологічні характеристики, незнімна опалубка

Постановка проблеми. Проектування та процес будівництва будівель та споруд безпосереднім чином взаємопов'язані технологічними аспектами при монтажі та самому будівництві. Вдосконалення полегшених залізобетонних конструкцій повинно здійснюватися у взаємозв'язку з розробкою відповідних технологічних процесів. Одним із перспективних підходів до зменшення ваги та матеріаломісткості конструкцій є застосування вкладок-порожнинистих, що не виймаються. Вони дозволяють формувати внутрішню геометрію залізобетонних елементів без втрати їх несучої здатності. Використання таких вкладок значно скорочує витрати на матеріали, покращує теплоізоляційні властивості конструкцій та знижує навантаження на фундамент. Проте впровадження таких технологій супроводжується низкою проблем:

1. Конструктивні обмеження – необхідність оптимального розташування пустот для забезпечення рівномірного розподілу напружень у конструкції.

2. Технологічні труднощі – забезпечення якісного ущільнення бетону навколо вкладок, особливо при використанні самоущільнюючих бетонів.

3. Організаційно-економічні аспекти – необхідність коригування існуючих норм і стандартів, а також забезпечення економічної доцільності застосування таких рішень.

4. Міцність та довговічність – вплив порожнин на тріщиностійкість та експлуатаційні характеристики конструкції.

Враховуючи ці аспекти, необхідно здійснювати комплексний підхід до проектування, що включає розрахункові моделі, експериментальні дослідження та оптимізацію будівельного процесу. Таким чином, раціоналізація параметрів зведення полегшених залізобетонних конструкцій сприяє підвищенню їх ефективності, економічності та довговічності, що є важливим чинником сталого розвитку будівельної галузі [1,3]. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розроблення методологічних засад підвищення ефективності процесу зведення полегшених залізобетонних конструкцій шляхом раціоналізації конструктивно-технологічних параметрів вертикальних і горизонтальних елементів. Зокрема, розглядається використання самоущільнювальних бетонів та вкладок-порожнистих, що залишаються

в конструкції після завершення бетонування. У сучасних наукових дослідженнях, присвячених удосконаленню конструктивних, організаційно-технологічних рішень і комплексної механізації при монтажі та будівництві конструкцій залізобетонних які повинні мати значно меншу вагу, встановлено, що їх монтаж супроводжується специфічними особливостями [3,6]. Водночас теоретичні та практичні аспекти цієї проблематики залишаються недостатньо розробленими, а оптимізація організаційно-технологічних рішень потребує подальшого удосконалення. Серед невирішених наукових проблем можна виділити такі аспекти: відсутність комплексної методики проектування будівель та споруд, використання сучасних технологічних рішень в самому будівництві; недостатнє дослідження впливу точності їх монтажу на потенційну енергію та її розподіл у конструкції; фрагментарність принципів організаційно-технологічного проектування процесу зведення; відсутність методологічних підходів до експериментальних досліджень, спрямованих на математичне прогнозування основних параметрів зведення таких конструкцій. Окрім цього, до актуальних завдань можна віднести розроблення конструктивних рішень з довільною геометрією та широкими можливостями об'ємно-просторової трансформації; створення умов для реалізації гнучких внутрішніх планувальних рішень; раціоналізацію витрат матеріалів і зменшення маси конструкцій при збереженні необхідних несучих характеристик; забезпечення мінімальної деформативності та формування ефективних технологій зведення полегшених залізобетонних конструкцій [2,5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наявних технічних і організаційно-технологічних рішень, що застосовуються під час зведення полегшених залізобетонних конструкцій, виявив низку актуальних проблем. Зокрема, існує необхідність у науковому обґрунтуванні методологічних основ забезпечення ефективності будівництва таких конструкцій шляхом раціоналізації параметрів виконання робіт. Запропоноване рішення передбачає застосування самоущільнюючих бетонів та вкладок-порожнистих, які залишаються в конструкції, для формування горизонтальних і вертикальних елементів. Питання технології та організації будівельного виробництва знайшли своє відображення в системних дослідженнях провідних учених, серед яких: С.С. Атаєв [3], М.С. Будніков [3], А.Д. Єсипенко [5], В.К. Черненко. Вагомий внесок у вивчення технологічних аспектів бетонування здійснили С.А. Бугаевский [1], П.Є. Григоровський, [4], а також зарубіжні дослідники С. Albrecht, J. Höfler[6], J. Schlumpf. Суттєвий прогрес у сфері розробки організаційно-технологічних рішень та механізації процесів будівництва полегшених залізобетонних конструкцій досягнуто завдяки роботам таких учених, як М.В. Савицький, А.О. Задорожний, В.С. Шмуклер, Nguyen-Thoi T., Jun-Seon Yoon, Melbye[7], J. Jasiczak, W. Majchrzak. Фундаментальними принципами обґрунтування ефективності використання вкладок-порожнистих є: зниження ваги конструкції за рахунок видалення неефективного матеріалу без втрати її несучої здатності; можливість створення перекриттів із більшими прольотами; зменшення навантаження на фундамент, що сприяє оптимізації проектних рішень; скорочення витрат на бетонну суміш та арматурну сталь; зниження трудомісткості та підвищення продуктивності будівельних процесів. Виконана класифікація методів зведення полегшених перекриттів із використанням полімерних вкладок, з урахуванням міжнародного досвіду, дозволила ідентифікувати чинники, що перешкоджають широкому впровадженню таких рішень у будівельну практику України. Основними проблемами є:

- недостатня виробнича база для масового виготовлення вкладок різних геометричних форм;

- висока вартість полімерних порожниноутворювачів;
- обмежені можливості варіювання форми внутрішніх пустот, що зумовлює типові рішення з обмеженням порожнистості до 30%;
- складність виконання армування та бетонування через велику кількість вкладок на одиницю площі перекриття;
- невідповідність стандартним методам раціоналізації перерізів інших конструктивних елементів, зокрема фундаментів, колон та діафрагм жорсткості.

Таким чином, необхідність розробки нових організаційно-технологічних підходів до зведення полегшених залізобетонних конструкцій є актуальною науковою проблемою, що потребує подальших досліджень і розробок.

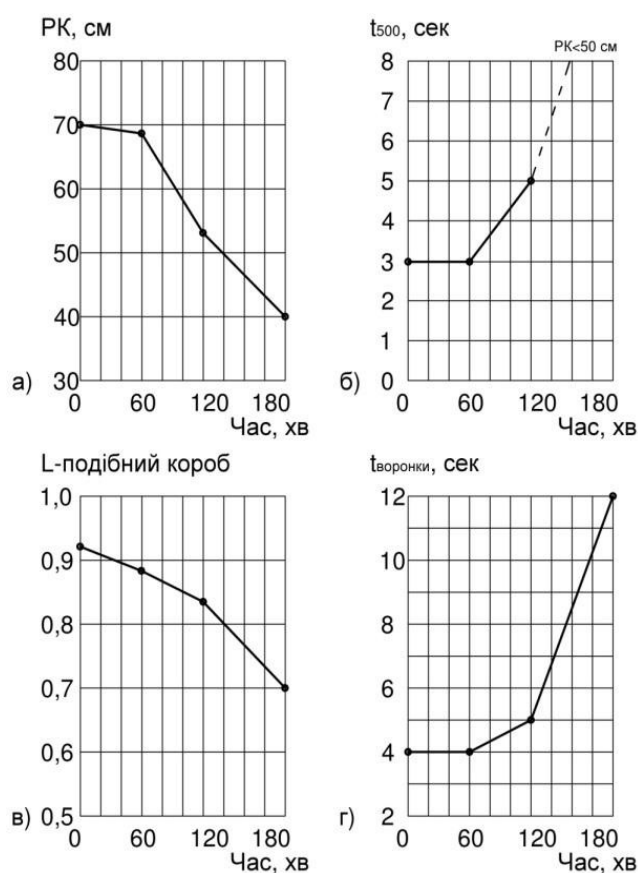
Постановка завдання. Метою даної роботи є використання в будівництві вкладок-порожнистих, що є ефективним рішенням для зменшення матеріаломісткості, покращення експлуатаційних характеристик конструкцій та скорочення витрат на будівництво. Чисельне моделювання підтверджує доцільність такого підходу, особливо в умовах обмеженого бюджету та необхідності підвищення ефективності будівельних процесів.

Виклад основного матеріалу. Сама процедура визначення для складу бетонних сумішей які мають ваду самоущільнюватись, відповідно до якого найбільш раціональним виявилось використання мінеральної добавки в кількості 20% від маси цементу, а також збільшення сумарного вмісту цементу та мінеральної добавки з 440 кг/м³ до 480–504 кг/м³. Додатково, підвищення частки піску за рахунок зменшення вмісту щебеню забезпечило здатність суміші долати перешкоди. Однак застосування модифікаторів в'язкості супроводжувалося або зниженням міцності бетону, або значною втратою рухливості суміші при збільшенні їх дозування.

Застосування двоетапного введення добавок, при якому використовується виключно суперпластифікатор, дозволяє підтримувати необхідні характеристики бетонної суміші без потреби у додаткових сповільнювачах або прискорювачах тверднення. Аналіз змін основних показників у часі свідчить, що за відсутності активного перемішування рухливість суміші, визначена методом розпливу конуса, починає помітно знижуватись вже через 60 хвилин після приготування. Водночас інші характеристики залишаються відносно стабільними протягом тривалішого періоду (рис. 1).

У процесі виконання робіт із влаштування залізобетонних перекриттів які складаються із використанням вкладок-порожнистих (вкладок) можуть виникати зміщення цих елементів відносно їхнього проєктного положення. Подібні відхилення можуть мати суттєвий вплив на конструктивну цілісність та експлуатаційні характеристики всієї системи перекриття. Серед основних причин таких зміщень виділяють технологічні особливості бетонування, похибки під час монтажу, а також зовнішні механічні впливи. Зокрема, при виконанні бетонування в дві стадії, фіксація положення вкладок здійснюється шляхом їх часткового занурення в щойно укладену бетонну суміш або завдяки певній послідовності укладання бетону у верхній частині плити. Такий метод фіксації не гарантує повної стабільності положення вкладок, особливо у випадку незначних коливань рівня бетонної суміші або при динамічному навантаженні під час виконання робіт. При бетонуванні в одну стадію стабілізація вкладок досягається через їх закріплення до арматурних елементів конструкції. Проте, у разі неправильного стикування арматурних каркасів або сіток, можливе зміщення як арматури, так і вкладки, що призводить до відхилення від проєктних параметрів. Крім того, мають місце й інші потенційно небезпечні фактори: недбале укладання вкладок під час монтажу може спричинити зменшення товщини нижньої обшивки, що, у свою

чергу, ускладнює належне бетонування та порушує цілісність поверхні. У випадках, коли бетон має високу рухливість, можливе спливання вкладок, що порушує рівномірність структури. Також зафіксовані випадки механічного впливу з боку працівників чи обладнання — наприклад, падіння ланок бетоноводу під час його збирання та розбирання — що може змістити вкладки в горизонтальній або вертикальній площині. Для дослідження впливу подібних відхилень було проведено експериментальне моделювання фрагмента полегшеного залізобетонного перекриття. Основною метою дослідження було визначення характеру переміщень конструкції та аналіз розподілу потенційної енергії залежно від положення вкладок. Розглядалися типові варіанти зміщень: вертикальне зсування внаслідок порушення товщини верхньої або нижньої обшивки, і поворот вкладки, який виникає через нерівномірне вертикальне зміщення при бетонуванні в одну стадію. Математичне та комп'ютерне моделювання здійснювалося з використанням програмного комплексу ЛІРА, що дозволяє точно оцінити напружено-деформований стан конструктивних елементів (рис.2).



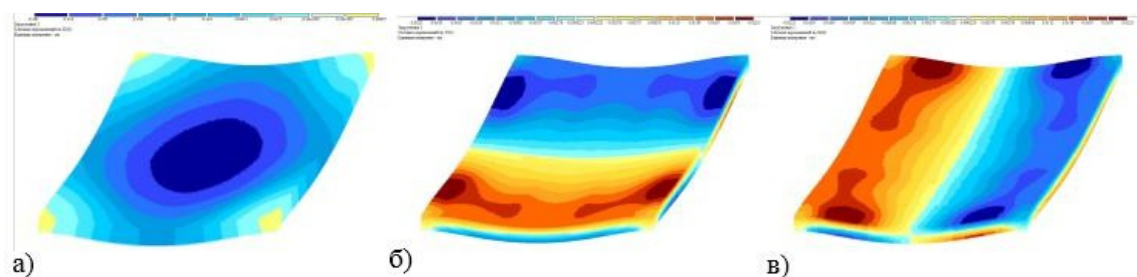
а) розпливання бетонної суміші з конуса; б) час при якому бетона суміш розтікається до діаметру 500 мм; в) час при якому бетонна суміш долає перешкоду з арматурними стержнями; г) час при якому бетонна суміш витікає із воронки V-подібної форми

Рисунок 1 – Графічне зображення даних бетонної суміші, яка має властивість самоущільнюватись, у часі (при температурі зберігання 22°C)

Джерело: розроблене авторами

Результати моделювання свідчать, що ключовим чинником, який впливає на стійкість та міцність перекриття, є точне положення вкладки по висоті. Відхилення від проектної висоти можуть призвести до зменшення жорсткості елемента, появи локальних деформацій та концентрації напружень, особливо у зонах переходу між обшивками і вкладками. Таким чином, дотримання точності геометрії під час монтажу

вкладок, забезпечення надійної фіксації та контроль за процесом бетонування є критичними умовами для досягнення проектної міцності та експлуатаційної надійності конструкції.



а) деформація по вісі Z; б) деформація по вісі Y; в) деформація по вісі X

Рисунок 2 – Переміщення у плиті перекриття від зсуву вкладок

Джерело: розроблене авторами

Висновки. Доведено, що зведення полегшених залізобетонних конструкцій являє собою багатокомпонентну стохастичну систему, у якій комбінації окремих елементів формують основу для оптимізації конструктивних, технологічних та організаційних рішень, особливо під час проектування об'єктів із раціональною геометрією. Виявлено дефіцит ефективних технологій створення внутрішніх порожнин складної конфігурації, що обумовлює актуальність розробки інноваційних підходів у цьому напрямі. Встановлено, що двоетапне введення суперпластифікатора забезпечує стабільність та оптимальні фізико-механічні характеристики бетонної суміші в процесі формування та тверднення. Показано, що вилучення неефективних у роботі матеріальних об'ємів дозволяє знизити масу конструкцій без зменшення їх несучої здатності. Аргументовано, що зниження власної ваги конструктивних елементів сприяє можливості перекриття більших прольотів, що розширює функціональні властивості архітектурних об'єктів. Обґрунтовано, що впровадження вставок при монтажі дозволяє зменшити трудомісткість робіт, скоротити тривалість будівельного циклу та знизити витрати на оплату праці.

Список літератури

1. Бугаєвський С.О. Теоретико-методологічні основи формування організаційно-технологічних рішень зведення полегшених залізобетонних конструкцій: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.08 / Харків. нац. ун-т. Харків, 2021. 398 с.
2. Мельник І.В. Напружено-деформований стан та експериментальне впровадження порожнистих бетонних і залізобетонних конструкцій: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Львів. нац. ун-т. Львів, 2021. 294 с.
3. Анпилов С.М., Атаєв С.С., Балицький В.С., Будніков М.С., Гусаков А.А., Данилов Н.Н., Литвинов О.О., Нестле Х., Теличенко В.І. *Дослідження технологічних рішень при зведенні залізобетонних будівель та споруд в будівництві. Будівельні матеріали та вироби*. Київ, 2023. Вип. 5. С. 12–17.
4. Арутюнян І.А., Бабиченко В.Я., Білоконь А.І., Галінський О.М., Галушко В.О., Гончаренко Д.Ф., Григоровський П.Є. *Вплив технологічних процесів на якість залізобетонних конструкцій. Технології бетону*. Київ, 2021. Вип. 7. С. 33–40.
5. Єсипенко А.Д., Кравчуновська Т.С., Менеїлюк О.І., Млодецький В.Р. *Інноваційні методи механізації процесів будівництва полегшених залізобетонних конструкцій. Механізація будівництва*. Київ, 2020. Вип. 2. С. 58–65.
6. Albrecht C., Höfler J., Schlumpf J. Technological advancements in concrete construction: A European perspective. *European Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 27, №. 4. P. 289–298.

7. Jasiczak J., Majchrzak W., Czajka W., Melbye T. Prefabrication and mechanization in modern concrete construction: Case studies from Europe. // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2016. Vol. 10, №. 3. P. 223–231.

References

1. Buhaievskiy S.O. (2021). *Teoretyko-metodolohichni osnovy formuvannia orhanizatsiino-tekhnologichnykh rishen zvedennia polehshenykh zalizobetonnykh konstruksii*. Doctor thesis. Kharkiv: (in Ukrainian).
2. Melnyk I.V. (2021). *Napruzhenno-deformovanyi stan ta eksperymentalne vprovadzhennia porozhnistykh betonnykh i zalizobetonnykh konstruksii*. Candidates thesis. Lviv: (in Ukrainian).
3. Anpylov S.M., Ataiev S.S., Balytskyi V.S., Budnikov M.S., Husakov A.A., Danylov N.N., Lytvynov O.O., Nestle Kh., Telychenko V.I. (2023). Doslidzhennia tekhnologichnykh rishen pry zvedenni zalizobetonnykh budivel ta sporud v budivnytstvi. *Budivelni materialy ta vyroby*. 5, 12–17 (in Ukrainian).
4. Arutiunian I.A., Babychenko V.Ia., Bilokon A.I., Halinskyi O.M., Halushko V.O., Honcharenko D.F., Hryhorovskiy P.Ie. (2021). Vplyv tekhnologichnykh protsesiv na yakist zalizobetonnykh konstruksii. *Tekhnolohii betonu*. 7. 33–40 (in Ukrainian).
5. Iesypenko A.D., Kravchunovska T.S., Meneiliuk O.I., Mlodetskyi V.R. (2020). Innovatsiini metody mekhanizatsii protsesiv budivnytstva polehshenykh zalizobetonnykh konstruksii. *Mekhanizatsiia budivnytstva*. 2. 58–65 (in Ukrainian).
6. Albrecht C., Höfler J., Schlumpf J. Technological advancements in concrete construction: A European perspective. *European Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 27, №. 4. P. 289–298.
7. Jasiczak J., Majchrzak W., Czajka W., Melbye T. Prefabrication and mechanization in modern concrete construction: Case studies from Europe. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2016. Vol. 10, №. 3. P. 223–231.

Ivan Skrynnik, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Marianna Fedotova**, PhD tech. sci.,
Victor Darienko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Artemenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Research of Technological Solutions in the Construction of Reinforced Concrete Buildings and Structures in Construction

The article highlights the current state of the problem and analyzes the constructive and organizational and technological solutions used in the construction of lightweight reinforced concrete structures.

The process of creating effective building systems is directly related to the technology of their implementation, since technological limitations often become a key factor affecting the feasibility of implementing certain engineering solutions. It is known that even the most innovative design concepts may remain unrealized due to the lack of appropriate technological support or the economic efficiency of their production. In this regard, the improvement of lightweight reinforced concrete structures should occur in close connection with the development of progressive technological processes aimed at ensuring the rational use of materials, reducing the dead weight of structures, and increasing their operational reliability. One of the promising areas is the use of hollow inserts that are not removed after the concrete hardens. Such elements allow you to shape the internal geometry of structures, ensuring a reduction in material consumption and weight characteristics without reducing the load-bearing capacity.

The use of such solutions requires a comprehensive approach, which includes: development of optimal structural parameters taking into account the geometric and mechanical characteristics of the inserts; numerical modeling of stress-strain processes to assess the effectiveness of the application of such technologies; economic feasibility analysis, which allows determining the balance between material costs and the resulting technical effect. Thus, the introduction of the latest technologies for manufacturing lightweight reinforced concrete structures is a promising direction that contributes to increasing the efficiency of construction production and the development of modern design methods.

lightweight reinforced concrete structures, hollow insert, self-compacting concrete, technological characteristics, fixed formwork

Одержано (Received) 14.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 30.04.2025
Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025

УДК 691.88

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.256-259](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.256-259)**І. О. Скриннік**, доц., канд. техн. наук, **М. О. Федотова**, канд. техн. наук,**В. В. Дарієнко**, доц., канд. техн. наук, **В. В. Яцун**, проф., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна**e-mail: Skrynnik_2002@ukr.net*

Застосування палевого кріплення ґрунтів при виконанні технології земляних робіт в незв'язних та сипучих ґрунтах

В умовах війни освоєння підземного простору у зв'язку з будівництвом укриттів і не лише справедливо можна вважати одним із найважливіших і динамічних напрямків у будівництві як України так і в цілому світі. В даній статті проведений аналіз існуючих способів для кріплення котлованів та траншей щоб не відбулось обвалення. Описаний новий метод і технологію протизсувного кріплення, які дозволяють тимчасово (на час виконання земляних робіт) стримувати земляні стінки вертикальні траншей та котлованів не малої глибини до 4 м від обвалу. Запропоновані рішення дуже актуальні в умовах щільної забудови, коли немає можливості влаштувати відкоси. Розглянута технологія є простою, дозволяє зменшити трудомісткість робіт в порівнянні з іншими методами та знижує їхню вартість.

стійкий масив, палеве кріплення, стрічкове кріплення, вертикальні стінки, земляні виїмки, стрижень, шпунт, площа зсуву, геометричний центр

Постановка проблеми. В сьогоденні будівництві простір який має підземне розташування використовують не тільки для комунікацій інженерних та об'єктів транспортних, але також використовується для будівництва громадських приміщень, багатоповерхових гаражів які знаходяться під землею, торгових центрів [2,3]. Враховуючи потреби будівельної галузі, була вирішена задача та розроблене рішення палевого кріплення стінок земляних споруд. Основні вимоги до кріплення: мінімальна трудомісткість; помірна вартість комплектуючих; висока технологічність; можливість використання для тимчасового утримання стін земляних споруд глибиною до 4 м у більшості видів ґрунтів. Особлива актуальність цієї технології проявляється у щільній забудові, де неможливо влаштувати відкоси [1,3]. Зокрема, необхідно враховувати складні геологічні умови, можливість підтоплення, високі вимоги до безпеки та екологічні аспекти будівництва. Використання сучасних матеріалів, технологій та методів проектування дозволяє не лише ефективно використовувати підземний простір, а й забезпечувати довговічність та безпеку споруд.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасному будівництві при виконанні земляних робіт часто стінки самого котлована або траншеї мають вертикальну складову. До загальновідомих методів, що застосовуються для цього, належать: технологія "стіна в ґрунті" [1]; інші методи, що передбачають зведення огорожуючих конструкцій із подальшою розробкою ґрунту. Ці технології є складними, трудомісткими та дорогими, тому їх застосовують лише за необхідності. Більш поширеними способами кріплення земляних виїмок з вертикальними стінками є: шпунтове кріплення; анкерне кріплення; розпірне кріплення; підкосне кріплення для котлованів [2]. Проте ці конструкції часто є або трудомісткими у виконанні, або дорогими у комплектності, або створюють перешкоди для робіт у котлованах і траншеях [1]. Розвиток підземного будівництва є ключовим елементом модернізації міської інфраструктури та підвищення стійкості міст до сучасних викликів, зокрема урбанізації, екологічних змін і безпекових загроз [2]. Застосування сучасних методів геотехнічного моделювання, використання високоякісних будівельних матеріалів та впровадження ефективних систем водовідведення й гідроізоляції є ключовими факторами

забезпечення довговічності та безпеки підземних споруд [4]. Особливу увагу необхідно приділяти питанням безпеки на етапах самого будівництва та експлуатації таких об'єктів, оскільки це зазнає впливу природних і техногенних факторів, зокрема рівня ґрунтових вод, деформаційних процесів у ґрунтах та сейсмічної активності [3]. Важливим аспектом є також створення оптимальних умов для перебування людей у підземних приміщеннях, що включає раціональну організацію систем вентиляції, освітлення та аварійної евакуації. Цій технології присвячені праці Теличко В.І.[1], присвячені роботи Самедов А.М [6], Савйовський В.В [2].

Постановка завдання. Метою даної роботи є використання в ґрунтах при земляних роботах пристрій анкерного кріплення який складається з:

1. Арматурного стержня ($\varnothing$ 12–24 мм) – довжина підбирається відповідно до глибини котловану.

2. "Пальового" гарпуна із шипами – для надійного закріплення у ґрунті.

3. Стрічкового огороження (дошки шириною 160–200 мм, товщиною 35–50 мм).

4. Пружинного конусного затискача – для фіксації дошки.

Ця система дозволяє ефективно утримувати вертикальні стінки виїмок без значного ускладнення будівельного процесу.

Виклад основного матеріалу. Підземні споруди можуть забезпечити додатковий простір для транспортної інфраструктури, комерційних і громадських об'єктів, сховищ, паркінгів та інженерних комунікацій. Використання підземного простору допомагає зменшити навантаження на наземну інфраструктуру, скоротити затори та знизити рівень забруднення повітря. Крім того, сучасні технології дозволяють зводити підземні об'єкти з високим рівнем енергоефективності та мінімальним впливом на довкілля. Наприклад, використання геотермальної енергії, інтеграція систем рекуперації тепла та природного освітлення сприяють створенню комфортного та економічно доцільного середовища. Таким чином, активне освоєння підземного простору є важливим напрямом розвитку міст, що дозволяє ефективно використовувати території, покращувати екологічну ситуацію та забезпечувати сталий розвиток урбанізованих територій.

В будівництві використовують наступні види анкерів: свердлильні анкери – встановлюються в попередньо пробурені свердловини, після чого закріплюються цементним або іншим розчином; гвинтові анкери – загвинчуються в ґрунт без попереднього буріння, що дозволяє швидко їх монтувати; ін'єкційні анкери – закріплюються за допомогою введення спеціальних розчинів під тиском, що підвищує їхню несучу здатність; механічні анкери – фіксуються за рахунок розширення або розклинювання в ґрунті. Вибір конкретного типу анкерів залежить від характеристик ґрунту, навантаження, що передається на кріплення, та умов будівництва. Використання комбінованих утримуючих систем особливо доцільне при значній глибині котловану або при складних геологічних умовах, коли традиційні методи кріплення можуть бути недостатньо ефективними. У таких випадках анкерні системи забезпечують надійне закріплення конструкції, а розпірні елементи допомагають контролювати горизонтальні переміщення та зменшують навантаження на анкери. Вибір конкретного поєднання анкерів, розпірних систем і підкосів залежить від багатьох факторів, таких як тип ґрунту, рівень ґрунтових вод, розміри та форма котловану, а також особливості конструкції, яка зводиться. Розроблене анкерне кріплення для тимчасової стабілізації вертикальних стін котлованів: є простим у виготовленні та монтажі; знижує трудомісткість робіт; зменшує вартість порівняно з традиційними методами; є ефективним рішенням для щільної міської забудови. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку детальної інженерної методики розрахунку надійності цього виду анкерного кріплення. Технологія встановлення кріплення цим пристроєм реалізується наступним чином (рис.1): арматурний стержень (1) з'єднується різьбовим з'єднанням (6) з "пальовим" гарпуном

(2) та занурюється за межі обвалу в ґрунт. Забивка палі відбувається на рівні центру геометричного (Гц) (рисунок 2) самого ґрунтового обвалу під кутом приблизно 90° ($\pm 15^\circ$). Необхідно контролювати, щоб забивка палі (2) сприяла мікроармуванню напруги (7) поряд існуючої (за наявності) будівлі (8). На вільний виступаючий кінець стержня арматурного (1) надягається огороження стрічкове (4), яке міцно притискається до ґрунтової маси та фіксується конусним затискачем (5). У такому стані палеве кріплення стримує обвалення ґрунту і запобігає руйнуванню відмостки (9) вже будівлі існуючої (8).

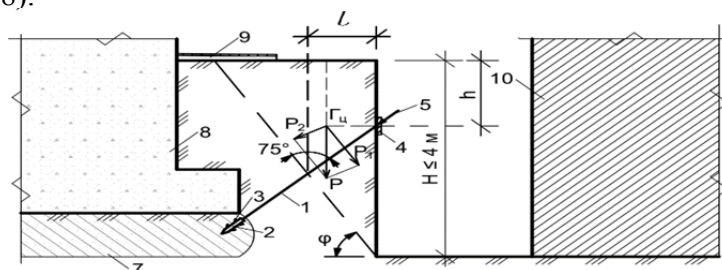


Рисунок 1 – Пальове розкріплення ґрунту під кутом 70°

Джерело: розроблене авторами

В центральній частині перерізу ґрунту обвалення знаходиться зусилля (рисунок 1-2), яке розкладається на зсувне зусилля. Занурення палі на рівні ґрунтового центру (Гц) перерізу зсувного масиву є найефективнішим способом збільшення прижимного зусилля $P_2 P$ та P_2 , що допомагає утримати масив від сповзання та протидіяти зсувному зусиллю $P_1 P$ і P_1 .

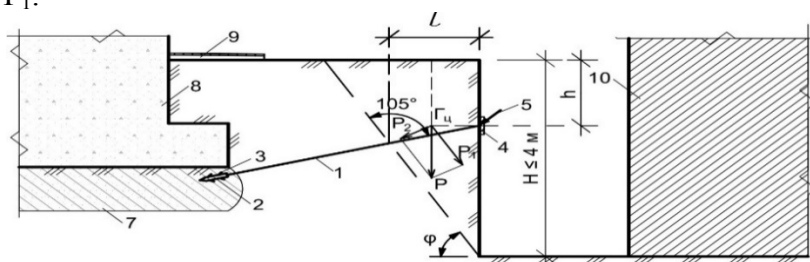


Рисунок 2 – Пальове розкріплення ґрунту під кутом 100°

Джерело: розроблене авторами

Якщо анкер забивається під кутом близько 90° до площини зсуву, він працює за своєю основною функцією. Проте забивка під кутом менше 75° фактично змінює принцип його роботи, наближаючи його до шпунтового огороження (консольної системи), що потребує значно більшої щільності розміщення анкерів. Це, своєю чергою, призводить до зростання витрат та трудомісткості робіт. Забивка палі під кутом понад 100° майже унеможливує демонтаж кріплення (1).

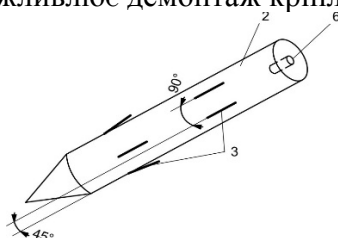


Рисунок 3 – Пальовий гарпун

Джерело: розроблене авторами

Крім того, ґрунтовий масив новобудованої споруди (10) ускладнює демонтаж стрижня 1 (рисунок 2). «Пальовий» гарпун (2) має шипи (3), виконані за принципом рибальського гачка. Вони розміщені на поверхні та розміщуються по колу в два ряди з

пемним кроком в 45° (рисунок 3). Така конструкція забезпечує легке забивання анкера та надійне зачеплення у стійкому ґрунтовому масиві.

Після завершення робіт у підземній частині будівлі (10) інвентарна частина пальового кріплення демонтується. Знімаються зажими (5), огороження стрічкове (4), а також стрижні (1) викручуються з різьбою (6) і готуються для наступного застосування. Гарпун (2) із шипами (3) залишається у ґрунті як елемент разового використання. Це є надзвичайно важливим аспектом у конструкції системи.

Висновки. Встановлено, що з розвитком висотного будівництва в даний час, сучасні багатоповерхові будинки повинні мати достатню кількість поверхів підземних для розташування інженерних мереж, паркінгів, підземних сховищ і укрить. Використання сучасних технологій і обладнання дають проєктувальникам та робітникам будівельникам вибір доступних методів зведення підземних споруд. Визначено, що запропонована технологія та пристрій протизсувального анкерного кріплення забезпечують тимчасову стійкість вертикальних стін ґрунтових споруд глибиною до 4 м під час будівництва споруди підземної частини. Це особливо важливо в умовах щільної забудови. Викладені принципи розрахунку сприятимуть подальшій розробці простої та доступної методики оцінки надійності такого кріплення. Доведено, що конструкція і технологія відзначаються простотою у виконанні та, порівняно з традиційними методами [2], дають змогу зменшити трудомісткість робіт до 28% і скоротити витрати на 12%.

Список літератури

1. Теличенко В. І., Терентьев О. М., Лapidус А. А. Технологія зведення будівель і споруд: навч. посіб. Вид. 2-ге переробл. і допов. Київ, 2004. 357 с.
2. Савйовський В. В. Будівельно-монтажні роботи в умовах реконструкції: нав. посіб. Київ, 1994. 258 с.
3. Самедов А.М. Розрахунок та проєктування підземних споруд мілкового закладання. Київ: НТУУ КPI, 2013, 852 с.
4. Sidney L. Project management in construction. New York : McGraw- Hill, 2006. P. 402.

References

1. Telychenko V. I., Terentiev O. M., Lapidus A. A. (2004). *Tekhnolohiia zvedennia budivel i sporud: Pidruchnyk dlia budivelnnykh*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Saviovskiy V. V. (1994). *Budivelnno-montazhni roboty v umovakh rekonstruktsii: Navchalnyi posibnyk*. Kyiv: ISDO [in Ukrainian].
3. Samedov A.M. (2013). *Rozrakhunok ta proiektuvannia heotekhnichnykh inzhenernykh sporud*. Kyiv: NTUU KPI [in Ukrainian].
4. Sidney, L. (2006). *Project management in construction*. New York: McGraw-Hill.

Ivan Skrynnik, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Marianna Fedotova**, PhD tech. sci.,
Victor Darienko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Yatsun**, Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Application of Soil Anchoring when Performing Earthworks Technology in Loose and Loose Soils

In today's conditions, the development of underground space can rightly be considered one of the most important and dynamic areas in civil and industrial construction at the global level. The article analyzes existing methods of fastening the walls of trenches and pits.

A new device and technology for anti-sliding anchor fastening are proposed, which allow temporarily (for the period of construction of the underground part of the building) to hold vertical walls of pits and trenches up to 4 m deep from sliding. The proposed solutions are especially relevant in conditions of dense development, when it is not possible to arrange slopes. In Ukraine, underground construction is gaining special importance in connection with Russia's aggressive war. Underground and buried structures are being built most actively in large cities and megacities. The main reasons for the need to use underground space in cities include the lack of free areas within the historically formed development and the requirements for the development of urban infrastructure.

The proposed technology is technologically simple, allows reducing labor intensity of the work compared to traditional methods and reduce their cost. The southern zone of Ukraine is one of the most developed territories, is actively being built up and developed. A significant part of the soil massifs of these territories is prone to landslides, which requires the use of anti-slip structures. However, such measures significantly increase construction costs, affecting the payback period of the facilities.

stable massif, anchor fastening, strip fastening, vertical walls, dense construction, earthworks, labor intensity, rod, spikes, shear plane, geometric center

Одержано (Received) 14.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 30.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 620.17

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.260-267](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.260-267)

О. Д. Деркач, доц., канд. техн. наук, Д. О. Макаренко, доцент, канд. техн. наук,
Є. С. Муранов, В. В. Сукачов, О. Ю. Береза, проф., д-р фіз.-мат. наук
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна,
e-mail: flymakd@gmail.com

Обґрунтування складу полімерно-композитного матеріалу конструкційного призначення для трибоспрямижень сільськогосподарської техніки

Наведено результати лабораторних досліджень щодо впливу вмісту вуглецевого волокна, в матриці поліаміду 6, на фізико-механічні характеристики полімерно-композитного матеріалу. Встановлено, що оптимальне значення вказаного наповнювача становить 20 мас. %, що забезпечує помірні характеристики полімерно-композитного матеріалу у поєднанні з незначною вартістю. Визначено вплив введення мастила ПМС-400 до композитного матеріалу на його межу текучості, ударну в'язкість та вологопоглинання.

полімерно-композитний матеріал, вуглецеві волокна, міцнісні характеристики, ударна в'язкість, зносостійкість.

Постановка проблеми. Сучасне машинобудування активно використовує не лише традиційні пластмаси й полімери, а й полімерно-композитні матеріали (ПКМ). Вони знаходять застосування у вузлах тертя, забезпечуючи їх захист від впливу агресивного середовища, а також можуть виступати як конструктивні елементи механізмів і машин. Завдяки унікальному поєднанню властивостей, ПКМ відкривають нові можливості для аграрного машинобудування. Висока міцність, стійкість до зношування і можливість досить простої технології зміни фізико-механічних характеристик, роблять ці матеріали ефективними для використання в умовах, характерних для сільськогосподарської техніки. Основною їх перевагою є збільшення експлуатаційного ресурсу техніки забезпечуючи при цьому суттєве зменшення маси, вищу корозійну стійкість та стійкість до дії агресивного середовища (добрива, ЗЗР, кислоти та ін.).

ПКМ мають прості та відносно недорогі, у порівнянні з сплавами, технології адаптації (модифікації), що дозволяє розробляти конструкційні матеріали із заданими характеристиками, адаптованими під конкретні умови експлуатації. Уведення різних наповнювачів (наприклад, скловолокна, вуглецевих, керамічних або базальтових волокон) у полімерну основу, дозволяє одержувати необхідний рівень міцнісних характеристик, зносостійкості та інших параметрів та властивостей. Це має особливе значення для вузлів тертя в сільськогосподарській техніці, де ПКМ забезпечують захист, зменшуючи вплив абразивного середовища та уповільнюючи зношування деталей.

Дослідження властивостей ПКМ дає змогу ефективно використовувати їх у вузлах тертя з урахуванням швидко-силового навантаження кожного конкретного механізму. Це підвищує надійність роботи всієї техніки загалом. Проте у вітчизняному сільськогосподарському машинобудуванні застосування ПКМ поки що обмежене через їхню високу вартість та відсутність власних розробок. Це зумовлено не лише дорогою сировиною, а й значними витратами на виробництво та обробку таких матеріалів. У той

час, як закордонні компанії, активно використовують ПКМ для підвищення надійності й довговічності своїх машин, вітчизняні виробники стикаються з необхідністю зниження витрат або залучення державної підтримки для здешевлення технологій.

Рухомі з'єднання деталей сільськогосподарської техніки, зокрема ґрунтообробних і посівних машин, зазнають значних ударних навантажень через взаємодію їх робочих органів із ґрунтом. Ці навантаження передаються на з'єднання, які повинні витримувати їх без руйнування. Тому однією з ключових характеристик ПКМ є ударна в'язкість. Вказана характеристика може суттєво змінюватися навіть за незначних змін у структурі ПКМ чи незначних відхиленнях від параметрів технологічного процесу одержання наповнених композитів.

Для досягнення оптимального балансу, між вартістю та надійністю, слід коригувати склад ПКМ відповідно до конкретних умов експлуатації сільськогосподарської техніки. Також, важливо забезпечити надійний захист деталей з ПКМ від негативного впливу зовнішнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одними перспективних напрямків щодо зменшення тертя в трибоспряженнях та підвищення рівня надійності техніки є застосування ПКМ [1-3]. Характеристики та властивості ПКМ залежать від складу матриці, типу наповнювачів та технології їх одержання. Дослідження ПКМ проводяться, як експериментальними, так і чисельними методами. Чисельні методи, такі як моделювання методом скінченних елементів, дозволяють прогнозувати поведінку матеріалів під навантаженням та оптимізувати їх склад. Так, у дослідженні [4] розглянуто можливості щодо підвищення триботехнічних характеристик ПКМ, для вузлів тертя сільськогосподарської техніки, шляхом комп'ютерного моделювання структури та напружень майбутнього матеріалу. Проте, важливим аспектом розробки та підвищення характеристик ПКМ є технологія та вартість його одержання. В роботах [5-6] запропоновано введення в структуру епоксидної смоли таких наповнювачів як карбід бору, оксиди алюмінію, хрому та порошок та тальку. Одержані результати підтверджують суттєве збільшення границі міцності одержаних композитів. Проте, автори звернули уваги на проблему якісного розподілення наповнювачів в матриці, так як їх концентрація становила від 0,5 до 1,5 % мас. Отримані результати свідчать, що границя міцності отриманих ПКМ досить висока, та сягає 80 МПа, в той час, як ударна в'язкість не перевищує 6,5 кДж/м². Тому такі матеріали матимуть досить обмежену сферу застосування, як конструкційні, у машинобудуванні. Серед матеріалів, що мають вищі фізико-механічні характеристики, широкого розповсюдження отримали ПКМ, на основі політетрафторетилену та наповнювачів на кшталт вуглецевих волокон, графіту та дисперсними металами [7, 8]. Проте, запропоновані технології мають високу вартість та помірний рівень характеристик отриманих матеріалів. Одними із перспективних щодо модифікації та застосування в машинобудуванні є матеріали на основі поліаміду 6 [9-11]. Проте, запропоновані у вказаних дослідженнях, технології осадження або використання значної дорожчих наповнювачів – вуглецевих нанотрубок та оксидів металів, призводить до суттєвого зростання собівартості ПКМ.

Постановка завдання. Використання того чи іншого наповнювача для майбутнього ПКМ вимагає визначення його оптимального вмісту в загальній структурі. Його кількість впливає не лише на характеристики матеріалу, а й на вартість сировини та готових виробів, що є ключовим фактором при виборі матеріалу для трибоспряжень у сільськогосподарській техніці.

Значна кількість наукових досліджень зосереджена на покращенні експлуатаційних характеристик та властивостей матеріалів, тоді як економічний аспект часто відходить на другий план. У результаті цього виникають ситуації, коли матеріали

з високими міцнісними характеристиками не знаходять широкого застосування через їхню високу собівартість.

Використання в ПКМ наповнювачів вимагає визначення оптимального їх вмісту та розподілу. Кількість наповнювача впливає не лише на експлуатаційні характеристики матеріалу, а й на собівартість сировини та кінцевих виробів, що є ключовим фактором при виборі матеріалу для трибоспрямижень у сільськогосподарській техніці. Саме тому, завданням роботи є обґрунтування оптимального складу ПКМ для застосування в трибоспрямиженнях сільськогосподарської техніки.

Методики досліджень. Дослідження границі текучості виконували на випробувальній машині FP-100/1, згідно ДСТУ EN ISO 604:2019. Експериментальні зразки для дослідження ПКМ на стискання були таких розмірів: діаметр циліндра 10 мм, висота циліндрів – 15 мм.

Ударну в'язкість досліджували відповідно до вимог ISO 179:1993 (без надрізу) за допомогою маятникового копру КМ-0,4.

Дослідження зносостійкості матеріалів в абразивному середовищі проводили шляхом вимірювання зносу всіх зразків за однакових режимів роботи. Для цього використовували машину СМЦ-2, оснащену спеціальним обладнанням, що забезпечує безперервну подачу стандартизованих абразивних частинок до зони тертя.

Зразки для дослідження матеріалів на відносну абразивну стійкість мали такі розміри: довжина зразка – 53 мм, ширина зразка становила 29 мм, товщина – 6...7 мм. Густина досліджуваних матеріалів визначали гідростатичним методом із використанням аналітичних терезів ВЛР-200. Масу нитки, що використовували для підвішування зразків до важеля не враховували при розрахунках.

Режими випробування:

- частота обертання ролика – 60 хв^{-1} ;
- тривалість дослідження – 5 хв (300 об. ролика);
- сила притискання ролика до зразку – 44 Н;

Відносну абразивну стійкість матеріалів визначали шляхом зважування зразків до та після примусового абразивного зношування.

Вологопоглинання ПКМ визначали відповідно до EN ISO 62:2008.

Виклад основного матеріалу. Для досліджуваних матеріалів виконано їх шифрування, що засновані концентрації у мас. % ВВ та силіконового мастила ПМС-400 у матриці полімеру. Першочерговим завданням є визначення оптимального вмісту ВВ в матриці поліаміду 6. Для цього в роботі запропоновано три варіації концентрації вказаного наповнювача – 15, 20 та 30 мас. %, відповідно із вмістом поліаміду 6 – 85, 80 та 70 мас. %. Умовні назви одержаних ПКМ без додавання в їх структуру мастила наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Шифри та вміст компонентів в одержаних матеріалах

№ з/п	Шифр матеріалу (вміст ВВ)	Співвідношення складових ПКМ, мас. %	
		Поліамід-6	Вуглецеве волокно
1	ВПА-6-15 (15 % ВВ)	85,0	15,0
2	ВПА-6-20 (20 % ВВ)	80,0	20,0
3	ВПА-6-30 (30 % ВВ)	70,0	30,0

Джерело: розроблено авторами

При проведенні досліджень на стискування розроблених матеріалів зафіксовано суттєву величину деформації та зміщення їх шарів у вертикальному напрямку, без утворення тріщин чи сколів досліджуваних зразків. Така поведінка матеріалу

підтверджує, що для досліджуваних ПКМ необхідно визначати його межу текучості. Випробування для кожного матеріалу виконували із семикратною повторюваністю.

Результати дослідження впливу вмісту ВВ мас. % у ПКМ на основі поліаміду на межу текучості та ударну в'язкість представлено на рис. 1. Дослідженнями встановлено (рис. 1), що зростання концентрації ВВ в ПКМ, призводить до зростання його межі текучості. Варто зазначити, що незначне підвищення концентрації ВВ з 15 мас. % до 20 мас. % майже не впливає на величину межі текучості. Водночас, підвищення концентрації ВВ вдвічі з 15 мас. % до 30 мас. % забезпечує збільшення межі текучості з 81,1 МПа до 86,5 МПа відповідно. Такий ефект пояснюється тим, що вуглеволокно має високі показники міцності та, рівномірно розподіляючись у матриці, виконує армуючу функцію в композиті.

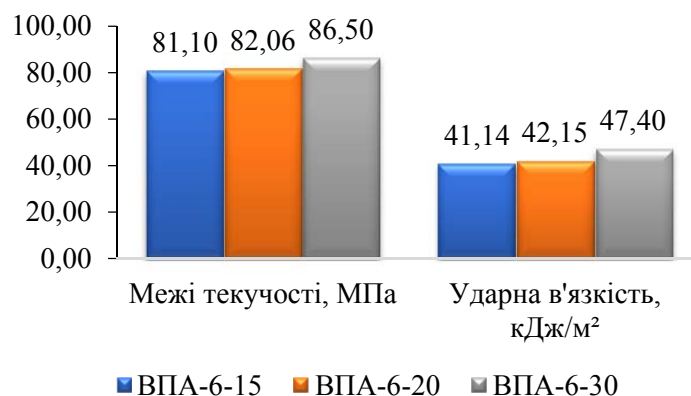


Рисунок 1 – Вплив вмісту вуглецевого волокна мас. % на межу текучості та ударну в'язкість ПКМ на основі поліаміду 6

Джерело: розроблено авторами

На основі отриманих результатів досліджень встановлено (рис. 1), що зростання концентрації ВВ у матриці поліаміду спричиняє підвищення ударної в'язкості ПКМ. При збільшенні концентрації з 15 мас. % до 20 мас. %, ударна в'язкість зростає всього на 2,4 % (із 41,1 кДж/м² до 42,1 кДж/м²). Подальше зростання вмісту ВВ в ПКМ до з 20 мас. % до 30 мас. % сприяє підвищенню ударної в'язкості до 47,4 кДж/м².

Водночас варто зазначити, що високі показники міцності матеріалів не завжди потрібні для забезпечення працездатності рухомих з'єднань сільськогосподарських машин. Крім того, підвищення концентрації ВВ призводить до значного зростання собівартості ПКМ через високу вартість вуглеволокна.

Результати визначення густини розроблених ПКМ представлено на рис. 2. Дослідженнями встановлено (табл. 2), що густина одержаних ПКМ корелюється із концентрацією ВВ у матриці полімерного матеріалу.

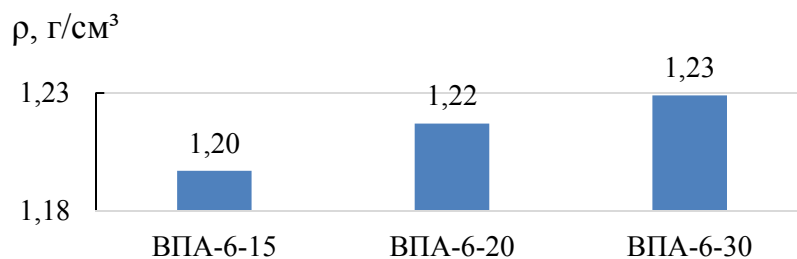


Рисунок 2 – Вплив концентрації ВВ на густину ПКМ

Джерело: розроблено авторами

Результати визначення величини зносу та відносної абразивної стійкості досліджуваних ПКМ наведено у табл. 2. В якості еталонного зразку у дослідженнях

обрано ПКМ, що містить 15 мас. % ВВ – ВПА-6-15. Результати залежності абразивної стійкості від складу ПКМ наведено в табл. 2.

Дослідженнями встановлено (табл. 2), що найбільшу відносну абразивну стійкість має матеріал, який обрано в якості еталонного – ВПА-6-15. Значення досліджуваного показника у ПКМ ВПА-6-20 виявилось дещо нижчим і становить 0,76.

Таблиця 2 – Результати дослідження ПКМ на відносну абразивну стійкість

№ з/п	Шифр матеріалу	$\Delta m_{\text{сер}}$	ρ , г/см ³	Відносна абразивна стійкість
1	ВПА-6-15	0,087	1,20	1
2				
3				
4	ВПА-6-20	0,116	1,22	0,76
5				
6				
7	ВПА-6-30	0,239	1,23	0,37
8				
9				

* $\Delta m_{\text{сер}}$ – маса зразку відповідно до дослідження, після дослідження, знос та середнє значення зносу на основі трьох досліджень.

Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що величина відносної зносостійкості для матеріалу ПКМ УПА-6-30 – найменша серед досліджуваних матеріалів, тому його не рекомендується використовувати для робочих органів ґрунтообробних машин і трибоспрямижень, що працюють в умовах наявності в робочій зоні абразивних частинок.

Науковими дослідженнями [12, 13] встановлено, в конструкціях рухомих з'єднань сільськогосподарської техніки питомий тиск зазвичай не перевищує 2...3 МПа. Саме тому, в якості ПКМ для трибоспрямижень сільськогосподарської техніки рекомендується використовувати поліамід 6, наповнений 20 мас. % ВВ.

Окрім забезпечення міцності деталей сільськогосподарських машин, важливим завданням є захист ПКМ від негативного впливу факторів робочого середовища, зокрема абразивних частинок (пилу) та вологи з повітря. Для захисту трибоспрямижень від абразивного зносу застосовують різні конструкції пильників або спеціальні мастильні матеріали. Розроблений ПКМ може функціонувати за наявності абразивних частинок у робочій зоні, однак питання його захисту від впливу вологи залишається актуальним.

В роботі виконані дослідження характеристик ПКМ ВПА-6-20 при введенні в його структуру силіконового мастила марки ПМС-400. Вплив введення мастила ПМС-400 в структуру композитного матеріалу ВПА-6-20 на його ударну в'язкість та межу наведено на рис. 3.

Отримані результати свідчать, що введення ПМС-400, до ПКМ ВПА-6-20 призводить до зниження його межі текучості. При цьому, незначна кількість мастила (0,5 мас. %) практично не впливає на цей показник. Однак подальше підвищення вмісту мастила до 1 мас. % і 2 мас. % призводить до більш суттєвого зниження межі текучості з 82,1 МПа для ненаповненого ПКМ до 79,5 МПа та 79,7 МПа відповідно.

Обраний діапазон 1...2% зумовлений тим, що ПКМ не здатен утримувати значну кількість мастила, яке в процесі переробки методом лиття під тиском виштовхується з матеріалу. Незначна кількість мастила не впливає на межу текучості ПКМ.

Отримані результати (рис. 3) дають підстави зробити обґрунтований висновок, що додавання силіконового мастила до ПКМ призводить до підвищення його ударної в'язкості, порівняно з ненаповненим матеріалом. Зокрема, введення 0,5 мас. % мастила незначно збільшує цей показник – лише на 2,3 %. Подальше підвищення вмісту мастила до 1 мас. % та 2 мас. % забезпечує зростання ударної в'язкості з 42,5 кДж/м² (ненаповнений матеріал) до 46,1 кДж/м² та 47,9 кДж/м² відповідно. Це підвищення пояснюється зниженням концентрації напружень завдяки рівномірному розподілу мастила в структурі ПКМ.

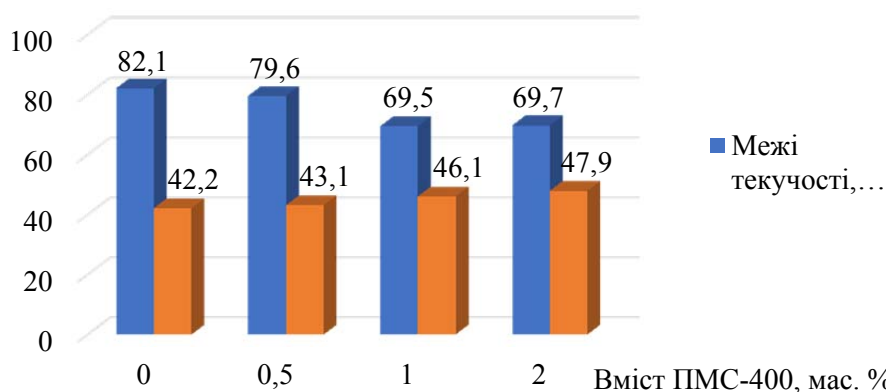


Рисунок 3 – Залежність концентрації ПМС-400 (у мас. %) на межу текучості та ударну в'язкість ПКМ ВПА-6-20

Джерело: розроблено авторами

На основі отриманих даних доцільним для використання є матеріал ВПА-6-20+0,5, який складається із 79,5 мас. % поліаміду 6 наповненого 20 мас. % ВВ та 0,5 мас. % силіконового мастила ПМС-400. Цей матеріал демонструє значну межу текучості 79,6 МПа та забезпечує високі показники ударної в'язкості – більше 43 кДж/м².

Окрім міцнісних характеристик, важливим параметром є рівень вологопоглинання ПКМ на основі поліаміду 6, оскільки цей матеріал характеризується гігроскопічністю. Вплив концентрації обраного мастила на вологопоглинання ПКМ представлено на рис. 4.

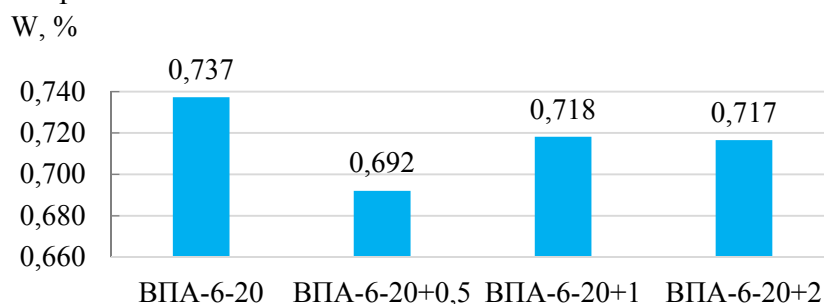


Рисунок 4 – Вплив вмісту мастила ПМС-400 на вологопоглинання ПКМ

Джерело: розроблено авторами

Аналіз отриманих результатів свідчить (рис.4), що додавання мастила ПМС-400 до ПКМ ВПА-6-20 не має значного впливу на його вологопоглинання. Встановлено, що мінімальне значення цього показника досягається при введенні 0,5 мас. %. Оскільки

різниця перебуває в межах похибки, можна стверджувати, що вказаний наповнювач, не впливає на здатність ПКМ накопичувати вологу із зовнішнього середовища. Водночас введення мастила ПМС-400 до складу ПКМ сприяє значному підвищенню ударної в'язкості при незначному зниженні межі текучості композитного матеріалу.

Висновки. На основі виконаних досліджень можна зробити такі висновки.

1. Збільшення концентрації вуглецевого волокна вдвічі з 15 мас. % до 30 мас. % суттєво не впливає на межу текучості (зростає всього на 6,6 %) полімерно-композитного матеріалу на основі поліаміду 6, при цьому величина ж ударної в'язкості збільшується на 15 %.

2. Визначено, що найбільшу зносостійкість серед досліджуваних матеріалів має поліамід 6 наповнений 15 мас. % вуглецевим волокном.

3. Встановлено, що внесення силіконового мастила до полімерно-композитного матеріалу сприяє значному збільшенню його ударної в'язкості, при несуттєвому зменшенні межі текучості, в порівнянні із ненаповненим ПКМ. Вплив вказаного наповнювача на вологопоглинання ПКМ несуттєвий.

Список літератури

1. Fengxia, D., Guoliang H., Fengxiang C. and oth. The lubricity and reinforcement of carbon fibers in polyimide at high temperatures. *Tribology International*. 2016. Vol 101. P. 291-300.
2. Застосування полімерних композитів в АПК: монографія / А. С. Кобець та ін. Дніпро: Журфонд, 2022. 356 с.
3. Kabat O. S., Sytar V. I., Sukhyu K. M. Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black. *Chemistry & chemical technology*. 2018. Vol. 12, № 3. P. 326-330. <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.326>.
4. Аулін В. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В., Лівіцький О. М., Бабій А. В. Закономірності впливу високомодульних наповнювачів на розподіл полів напружень в поверхневих шарах деталей машин, виготовлених з полімерних композитних матеріалів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36) І. С. 55-70.
5. Голотенко С. М. Вплив комплексної дії різнодисперсних наповнювачів та зовнішніх силових полів на експлуатаційні характеристики епоксикомпозитів. *Вісник ТДТУ*. 2005. № 2, т. 10. С. 35-39.
6. Підковинська У. В., Савченко В. О. Вплив наповнювачів на структуру та властивості полімерної матриці. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2024. № 1. С. 24-30. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2024-1-4>.
7. Кабат О.С., Душейко М.В. Полімерні композиційні матеріали спеціального призначення на основі фторопласту. *Технологічні системи*. 2017. №81/4. С. 63-67. [dx.doi.org/10.29010/081.8](https://doi.org/10.29010/081.8).
8. Wang A. H., Xia J., Yang Z. X., Xiong D.H. A novel assembly of MoS₂-PTFE solid lubricants into wear-resistant micro-hole array template and corresponding tribological performance. *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 116. P.171-179. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.033>.
9. Братичак М. М., Красінський В. В., Чопик Н. В., Земке В. М. Термомеханічні властивості композицій на основі поліаміду-6, одержаних з розчину. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2022. № 1, т. 5. С. 193-198. <https://doi.org/10.23939/ctas2022.01.193>.
10. Полімерні композити нановуглець – метал: структура і електричні властивості: наук. монографія / Лазаренко О. А., Вовченко Л. Л., Овсієнко І. В., Мацуй Л. Ю. Вінниця : ТВОРИ, 2018. 200 с.
11. Fakoori E, Karami H. Preparation and characterization of ZnO-PP nanocomposite fibers and non-woven fabrics. *The Journal of The Textile Institute*. 2018; Vol. 109, № 9. P. 1152-1158. <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1417681>.
12. Науменко М. М., Макаренко Д. О., Гурідова В. О., Крутоус Д. І. Математична модель взаємодії сошника посівного комплексу з ґрунтом за ускладнених умов його експлуатації. *Математичне моделювання*. 2021. № 1 (44). С. 55-61. [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(44\)2021.235926](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(44)2021.235926).
13. Розробка композитних елементів необслуговуваних рухомих з'єднань машин і механізмів: монографія / Д. О. Макаренко та ін. Дніпро: Журфонд, 2022. 148 с.

References

1. Fengxia, D., Guoliang, H., Fengxiang C. et al. (2016). The lubricity and reinforcement of carbon fibers in polyimide at high temperatures. *Tribology International*, 101, 291-300.
2. Kobets, A.S., Derkach, O.D., Chyhvintseva, O.P. et al. (2022). *Application of polymer composites in the agricultural industry*. Dnipro: Zhurfond [in Ukrainian]

3. Kabat, O., Sytar, V., Sukhyi, K. (2018). Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black. *Chemistry & chemical technology*, Vol. 12, 3, 326-330. <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.326>
4. Aulin, V.V., Hryniv, A.V., Lysenko, S.V., Livitskiy, O.M. & Babii A.V. (2022). Regularities of the influence of high-modulus fillers on the distribution of stress fields in the surface layers of machine parts made of polymer composite materials. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 5(36) I, 55-70 [in Ukrainian].
5. Holotenko, S.M. (2005). The influence of the complex action of heterogeneously dispersed fillers and external force fields on the performance characteristics of epoxy composites. *Visnyk TDTU*, 10 (2), 35-39 [in Ukrainian].
6. Pidkovynska, U.V., Savchenko, V.O. (2024). The influence of fillers on the structure and properties of the polymer matrix. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 1, 24-30. DOI 10.15588/1607-6885-2024-1-4 [in Ukrainian].
7. Kabat, O. S., Dushevko, M.V. (2017). Polymer composite materials of special purpose based on fluoroplastics. *Tekhnologichni systemy*, 4(81), 63-67. <https://doi.org/10.29010/081.8> [in Ukrainian].
8. Wang, A.H., Xia, J., Yang, Z.X., Xiong, D.H. (2019). A novel assembly of MoS₂-PTFE solid lubricants into wear-resistant micro-hole array template and corresponding tribological performance. *Optics & Laser Technology*, 116, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.033>
9. Bratychak, M.M., Krasynskiy, V.V., Chopyk, N.V., Zemke, V.M. (2022). Thermomechanical properties of polyamide-6-based compositions obtained from solution. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 5 (1), 193-198. <https://doi.org/10.23939/ctas2022.01.193> [in Ukrainian].
10. Lazarenko, O.A., Vovchenko, L.L., Ovsienko, I.V. & Matsui, L.Iu. (2018). *Nanocarbon-metal polymer composites: structure and electrical properties*. Vinnytsia: TOV «Tvory» [in Ukrainian].
11. Fakoori, E., Karami, H. (2018). Preparation and characterization of ZnO-PP nanocomposite fibers and non-woven fabrics. *The Journal of The Textile Institute*, 109 (9), 1152-1158.
12. Naumenko, M.M., Makarenko, D.O., Huridova, V.O., Krutous, D.I. (2021). Mathematical model of the interaction of the seeding complex coulter with the soil under difficult operating conditions. *Matematychni modelivannia*, 1 (44), 55-61. [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(44\)2021.235926](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(44)2021.235926) [in Ukrainian].
13. Makarenko, D.O., Derkach, O.D., Hryniv, A.V. et al. (2022). *Development of composite elements for maintenance-free moving joints of machines and mechanisms*. Dnipro: Zhurfond [in Ukrainian].

Oleksii Derkach, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Makarenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

Yevhen Muranov, **Valerii Sukachov**, **Olena Bereza**, Prof, Doc. Phys.-Mat.Sc.

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Justification of the Composition of a Polymer Composite Material for Structural Purposes for Tribocouplings of Agricultural Machinery

The purpose of the work is to substantiate the optimal composition of polymer-composite materials for use in tribocouplers of agricultural machinery.

The study was conducted on the influence of fillers on the physical and mechanical characteristics of a polymer composite material based on polyamide 6. It was found that an increase in the carbon fiber content in the PCM leads to an increase in the yield strength of the resulting composite. At the same time, an increase in the carbon fiber concentration from 15 wt. % to 20 wt. % causes a slight increase in the studied indicator. An increase in the carbon fiber concentration to 30 wt. % allows obtaining a material with a significantly higher yield strength - 86.5 MPa. An increase in the content of BBs in the matrix of the polymer material also leads to an increase in the impact strength. In the case of an increase in the concentration from 15 wt. % to 20 wt. %, the impact strength increases by 8.3%. For the VPA-6-30 material, with a BB content of 30 wt. %, the impact strength increases by 13%, compared to the VPA-6-20 material. It was established that the material VPA-6-15 has the highest relative abrasive wear resistance. Slightly lower values of the indicated studied indicator were recorded in the PCM VPA-6-20 – 0.759. The introduction of silicone lubricant into the PCM contributes to an increase in impact strength, compared to the original material, with a slight decrease in its yield strength.

Increasing the concentration of carbon fiber by half from 15 wt. % to 30 wt. % does not significantly affect the yield strength (it increases by only 6.6 %) of the polymer composite material based on polyamide 6, while the impact strength increases by 15 %. It was determined that the highest wear resistance, among the studied materials, is polyamide 6 filled with 15 wt. % carbon fiber. It has been established that the addition of silicone lubricant to a polymer composite material contributes to a significant increase in its impact strength, with a slight decrease in the yield strength, compared to the original material. The effect of this filler on the moisture absorption of the PCM is insignificant.

polymer composite material, carbon fibers, strength characteristics, impact strength, wear resistance

Одержано (Received) 18.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 10.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.025

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.268-277](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.268-277)**І. Б. Гевко**, проф., д-р техн. наук, **В. О. Тесля**, доц., канд. техн. наук,**М. Д. Сіправська**, **Б. Р. Гевко**, канд. екон. наук, **Р. В. Хорошун***Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: volodymyr_teslya@ukr.net*

Нові технології для підвищення безпеки дорожнього руху на пішохідних переходах та регульованих перехрестях

У статті розглянуто питання підвищення ефективності та безпеки дорожнього руху за допомогою впровадження нових технологій у сфері пішохідних переходів та регулювання транспортних потоків. Досліджено ефективність сенсорних нерегульованих пішохідних переходів, сенсорних регульованих переходів із розумними світлофорами та регульованих перехрестів з адаптивними світлофорними системами. Проаналізовано їх вплив на зниження аварійності та покращення організації дорожнього руху. Запропоновано практичні рекомендації щодо їх впровадження у міську інфраструктуру.

Зростання кількості транспортних засобів та інтенсифікація руху в містах спричиняють підвищення рівня аварійності, особливо на пішохідних переходах та регульованих перехрестях. Традиційні методи регулювання дорожнього руху не завжди є ефективними, оскільки не враховують динамічні зміни транспортного потоку та поведінкові особливості учасників дорожнього руху. Впровадження інтелектуальних транспортних систем здатне суттєво покращити ситуацію, забезпечуючи автоматизоване управління рухом за допомогою сучасних технологій.

транспортні системи, безпека дорожнього руху, розумні світлофори, сенсорні пішохідні переходи, адаптивне регулювання трафіку

Постановка проблеми. Незважаючи на впровадження різних заходів щодо покращення безпеки дорожнього руху, рівень аварійності на пішохідних переходах та регульованих перехрестях залишається високим. Основними причинами є людський фактор, неефективне регулювання дорожнього руху і недостатнє використання сучасних технологій контролю та управління транспортними потоками.

Нерегульовані пішохідні переходи часто стають місцем підвищеного ризику через непередбачувану поведінку пішоходів і водіїв, а також через низьку видимість у складних погодних умовах. Регульовані переходи та світлофорні об'єкти також мають свої недоліки, зокрема недостатню адаптивність до змін у трафіку, що може призводити до неефективного використання часу очікування для пішоходів та транспортних засобів.

У зв'язку з цим виникає потреба в дослідженні та впровадженні нових транспортних систем, які здатні в реальному часі аналізувати ситуацію на дорозі, адаптувати режими роботи світлофорів та покращувати безпеку всіх учасників дорожнього руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Безпека дорожнього руху є однією з ключових проблем сучасних міст. Зростання кількості транспортних засобів, підвищення інтенсивності руху та урбанізація призводять до збільшення випадків дорожньо-транспортних пригод, особливо за участю пішоходів, що підтверджується дослідженням авторів [1, 2]. Одним із важливих аспектів покращення безпеки є впровадження нових технологій у сфері регулювання руху та пішохідних переходів.

Дослідження функціонування перехресть [3-6] із нерегульованими та регульованими переходами мають низку обмежень, які не завжди дозволяють ефективно забезпечити безпеку учасників дорожнього руху. Впровадження сенсорних систем та розумних світлофорів дає змогу значно підвищити ефективність регулювання руху та зменшити рівень аварійності.

Наукові дослідження [7, 8] в сфері безпеки дорожнього руху та нових транспортних систем показують, що застосування адаптивних світлофорних технологій та сенсорних систем значно покращує ситуацію на дорогах. У ряді досліджень розглянуто ефективність використання датчиків руху, відеоаналізу та штучного інтелекту для автоматизації управління транспортними потоками. Науковці підкреслюють, що сенсорні пішохідні переходи дозволяють суттєво скоротити час реакції водіїв та знизити ризик наїздів на пішоходів. Крім того, аналіз існуючих систем адаптивного управління світлофорами вказує на те, що вони здатні суттєво зменшити затримки на перехрестях та підвищити загальну пропускну здатність дорожньої мережі. Разом із тим, існує потреба у подальших дослідженнях щодо оптимізації алгоритмів управління світлофорами, їхньої інтеграції з іншими транспортними системами та оцінки економічної доцільності масштабного впровадження таких технологій у міських умовах.

У сучасних наукових дослідженнях [7, 9] розглядаються різні підходи до оптимізації руху транспорту та підвищення безпеки пішоходів. Зокрема, активно використовуються спеціалізовані програмні комплекси, такі як VISSIM, PARAMICS, AIMSUN, SISTM, SIDRA, FLEXYST, DRACULA та інші, які дозволяють моделювати транспортні потоки, оцінювати ефективність адаптивних алгоритмів керування світлофорами та прогнозувати потенційні конфліктні ситуації. Впровадження таких технологій сприяє розробці оптимальних рішень для зниження аварійності та покращення умов для всіх учасників дорожнього руху.

Одним із перспективних методів аналізу та оптимізації роботи регульованих перехресть є використання імітаційного моделювання. Як зазначено в науковому дослідженні [7], цей підхід дозволяє оцінювати різні сценарії руху транспорту, використовуючи адаптивні алгоритми керування, побудовані на основі нечіткої логіки. Така методика сприяє підвищенню ефективності роботи транспортних потоків завдяки врахуванню особливостей руху пішоходів та громадського транспорту. Застосування імітаційного моделювання також дає змогу визначати оптимальні стратегії організації руху, що сприяє зниженню аварійності та підвищенню безпеки для всіх учасників дорожнього руху. У роботах [10, 11] розглядається досвід аналізу дорожніх умов та характеристик транспортних і пішохідних потоків у міському середовищі, що є важливим етапом розробки комплексних заходів для підвищення безпеки на перехрестях. Таким чином, інтеграція сучасних технологій у сферу дорожнього руху, зокрема імітаційного моделювання та інтелектуальних алгоритмів керування, дозволяє створювати більш ефективні та безпечні транспортні системи.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є аналіз та оцінка ефективності сенсорних нерегульованих пішохідних переходів, сенсорних регульованих переходів із розумними світлофорами та регульованих перехресть з адаптивними світлофорними системами.

Виклад основного матеріалу. Сучасні транспортні технології розвиваються в напрямку підвищення безпеки руху як для водіїв, так і для пішоходів. Впровадження нових транспортних систем базується на використанні сучасних технологій, таких як датчики руху, відеоаналіз, штучний інтелект і зв'язок транспортної інфраструктури з хмарними обчисленнями. Сенсорні нерегульовані пішохідні переходи оснащені

детекторами, що дозволяють вчасно попереджати водіїв про наявність пішоходів на переході. Це суттєво знижує ризик аварійних ситуацій, особливо в умовах недостатньої видимості.

Розумні світлофори, що використовуються на регульованих переходах і перехрестях, здатні аналізувати інтенсивність руху та адаптувати режими сигналізації відповідно до поточної ситуації. Використання алгоритмів штучного інтелекту дозволяє мінімізувати затримки та покращувати пропускну здатність транспортних вузлів. Адаптивні світлофорні системи на регульованих перехрестях можуть інтегруватися з іншими транспортними технологіями, зокрема системами управління рухом громадського транспорту, що сприяє підвищенню ефективності міських перевезень. Це дозволяє досягти оптимального балансу між безпекою та швидкістю переміщення транспорту і пішоходів.

Одним із актуальних завдань є покращення умов видимості на нерегульованих пішохідних переходах, особливо в темний час доби. Відсутність належного освітлення та своєчасного інформування водіїв про появу пішоходів значно підвищує ризик аварійних ситуацій. Одним із рішень цієї проблеми є впровадження сенсорного нерегульованого пішохідного переходу, що забезпечує автоматичне освітлення та інформування водіїв про потенційну небезпеку.

Відомим технічним рішенням є сенсорний нерегульований пішохідний перехід, що складається із дорожніх знаків на стійках із вмонтованими сенсорними датчиками, які завчасно попереджають про рух на нерегульованому пішохідному переході [12]. Проте недоліком цього рішення є обмежена зона інформування водіїв, що може бути недостатньою у випадку несприятливих погодних умов або недостатньої видимості в темний час доби.

Розроблений нами проєкт удосконаленого сенсорного нерегульованого пішохідного переходу (пат. України № 152286) [13] забезпечує своєчасне інформування водіїв про появу пішоходів за допомогою додаткових сенсорних датчиків, встановлених за 60-70 м до переходу, та автоматичне включення освітлення для покращення видимості (рис. 1).

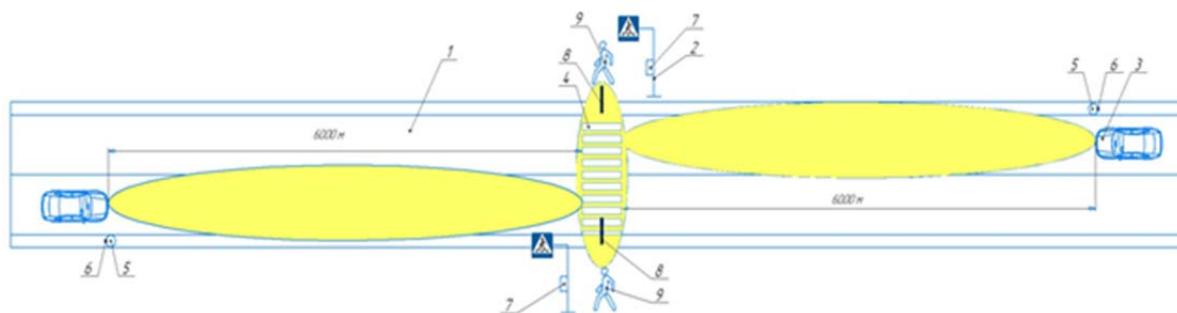


Рисунок 1 – Сенсорний нерегульований пішохідний перехід:

- 1 – дорожнє полотно; 2 – стійка дорожніх знаків; 3 – автомобіль; 4 – пішохідний перехід; 5 – стовбець;
6, 7 – сенсорні датчики; 8 – світильник; 9 – пішохід

Джерело: розроблено авторами з використанням [13]

Запропонований сенсорний нерегульований пішохідний перехід складається з:

- дорожніх знаків на стійках, у яких вмонтовані сенсорні датчики на рівні 0,3-0,5 м для фіксації появи пішоходів;
- стовпців, нерухомо встановлених за 60-70 м до пішохідного переходу паралельно повздовжній осі дороги;

- додаткових сенсорних датчиків, що вмонтовані в стовпці на рівні 0,3-0,5 м для фіксації наближення транспортних засобів;
- світильників, розташованих над пішохідним переходом і пов'язаних із сенсорними датчиками.

Принцип роботи: коли пішохід наближається до переходу, сенсорні датчики в дорожніх знаках фіксують його появу і подають сигнал на світильники, які вмикають освітлення переходу. Аналогічно, при наближенні автомобіля до пішохідного переходу додаткові сенсорні датчики в стовпцях фіксують його рух і активують освітлення, забезпечуючи водію завчасне інформування.

Запропонована система дозволяє підвищити рівень безпеки на нерегульованих пішохідних переходах шляхом автоматичного освітлення та попередження водіїв про появу пішоходів. Це сприятиме зменшенню кількості дорожньо-транспортних пригод, особливо у темний час доби та в умовах поганої видимості.

Попереднє рішення щодо сенсорного нерегульованого пішохідного переходу з автоматичним освітленням забезпечує безпеку в умовах недостатньої видимості. Проте, для покращення транспортного потоку та зменшення непродуктивного простою транспортних засобів необхідно впроваджувати інтелектуальну систему регулювання світлофорів.

Такими відомим технічним рішенням є безпечний регульований пішохідний перехід, що складається із світлофора з кнопками перемикання режиму руху [14]. Основним недоліком цього рішення є надлишковий простій транспортних засобів через фіксовану тривалість дозволяючого та забороняючого сигналів світлофора, незалежно від фактичної наявності пішоходів на переході.

Тому, було розроблено сенсорний регульований пішохідний перехід з розумним світлофором (пат. України № 155001) [15], що динамічно змінює сигнали залежно від наявності пішоходів, тим самим скорочуючи час простою транспортних засобів та зменшуючи рівень забруднення довкілля (рис. 2).

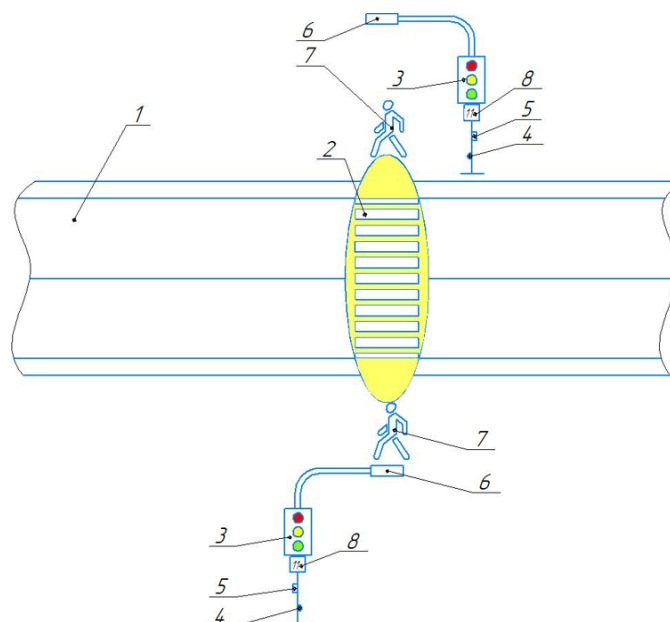


Рисунок 2 – Сенсорний регульований пішохідний перехід з розумним світлофором:
1 – дорожнє полотно; 2 – пішохідний перехід; 3 – світлофорна тумба; 4 – опора світлофора;
5 – кнопка перемикання світлофора; 6 – сенсорні датчики фіксації; 7 – пішохід

Джерело: розроблено авторами з використанням [15]

Запропонований сенсорний регульований пішохідний перехід з розумним світлофором складається з:

- опори світлофора, розташованих на пішохідному переході з обох сторін дорожнього полотна;
- світлофорних тумб із кнопками перемикання режиму руху;
- сенсорних датчиків, вмонтованих в опори світлофора для фіксації появи пішоходів;
- інформуючих цифрових табло, які відображають час, відведений на перехід.

Принцип роботи: пішохід натискає кнопку перемикання світлофора, що активує забороняючий сигнал для транспорту та відображення часу на цифрових табло. Сенсорні датчики фіксують рух пішохода, а після його виходу з переходу світлофор автоматично перемикається на дозволяючий сигнал для транспорту, навіть якщо відведений час ще не завершився.

Запропоноване рішення дозволяє оптимізувати рух транспорту, зменшити простой, витрати пального та рівень забруднення повітря. Інтелектуальне керування світлофором підвищує загальний рівень безпеки та комфорту всіх учасників дорожнього руху.

Новим підходом до управління рухом на регульованих перехрестях, зокрема для пішоходів та транспортних засобів, є регульоване перехрестя з розумним світлофором, оснащеним сенсорами руху, що дозволяє оптимізувати час очікування та зменшити надлишкові витрати палива і забруднення навколишнього середовища. Система автоматично реагує на наближення транспортних засобів та пішоходів до перехрестя, що дозволяє підвищити ефективність та безпеку дорожнього руху.

Відомим рішенням є використання безпечного регульованого пішохідного переходу, в якому світлофори автоматично регулюють рух пішоходів і транспортних засобів. Однак ці системи можуть призводити до надмірних затримок, оскільки сигнал світлофора не завжди синхронізується з потоком транспорту чи пішоходів, що в свою чергу збільшує час простою і витрати палива. Запропоноване нами рішення (пат. України № 157321) полягає в створенні розумного світлофора [16], який оснащений сенсорами руху, що дозволяють виявляти наближення транспортних засобів або пішоходів до перехрестя. Сенсори фіксують рух і передають дані до центрального приладу, який автоматично розраховує найбільш оптимальний момент для вмикання зеленого сигналу, враховуючи швидкість і напрямок руху. Це дозволяє значно зменшити час очікування, знизити витрати палива та зменшити забруднення.

Складові компоненти системи:

- опори світлофора – розташовані з обох сторін дорожнього полотна на перехресті, містять світлофорні тумби, що регулюють потік транспорту та пішоходів.
- сенсорні датчики руху – вмонтовані в світлофорні тумби для фіксації наближення транспортних засобів та пішоходів.
- центральний прилад – розраховує, коли саме подавати дозвіл на рух, з урахуванням відстані, швидкості та інтенсивності руху.

При наближенні транспортного засобу чи пішохода до перехрестя сенсорні датчики виявляють це заздалегідь. Дані з сенсорів передаються до центрального приладу, який вираховує, коли найбільш доцільно включити дозволяючий сигнал на світлофорі. Враховуючи, яка одиниця рухається швидше, прилад оптимізує час для кожного потоку руху. Це дозволяє зменшити зайвий час простою, уникнути зайвих витрат палива та знизити рівень забруднення (рис. 3).

Переваги запропонованої системи:

- зменшення часу простою – оптимізація світлофорних сигналів відповідно до інтенсивності руху;
- економія палива – за рахунок зменшення часу, що витрачається на очікування;
- зниження забруднення – зменшення викидів через ефективніше використання часу на перехрестях;
- покращення безпеки – за допомогою інтелектуального підходу до регулювання руху з урахуванням реальної ситуації на дорозі.

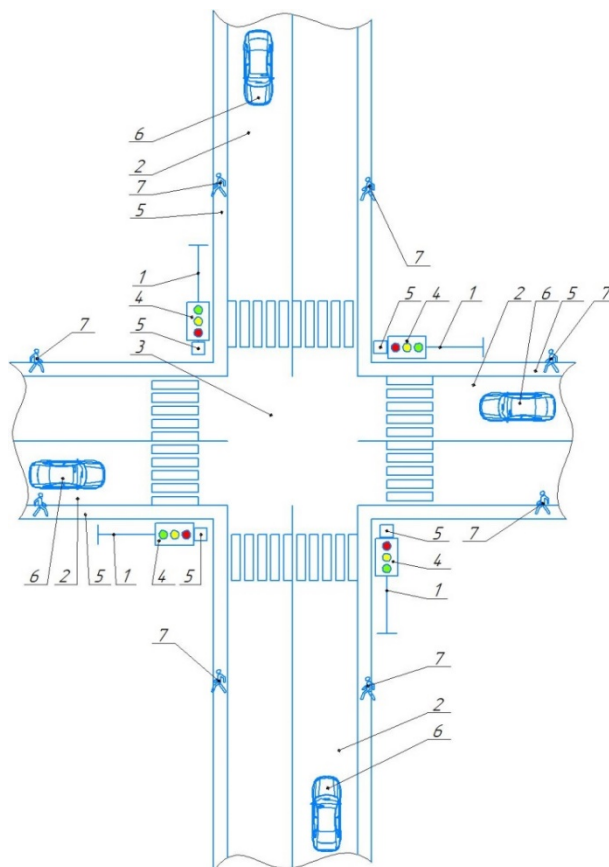


Рисунок 3 – Регульоване перехрестя з розумним світлофором:

1 – опора світлофора; 2 – дорожнє полотно; 3 – перехрестя; 4 – світлофорна тумба;
5 – сенсорні датчики руху; 6 – транспортний засіб; 7 – пішохід

Джерело: розроблено авторами з використанням [16]

Запропонована система розумного світлофора є важливим кроком до покращення безпеки дорожнього руху та підвищення ефективності транспортних потоків. Вона дозволяє значно знизити надлишкові затримки та зробити рух більш передбачуваним і комфортним для всіх учасників. Ця технологія має великий потенціал для впровадження в умовах сучасних міських агломерацій з інтенсивним рухом.

Загалом запропоновані проекти є важливим кроком до майбутнього розумних міст, де технології не лише оптимізують час, але й забезпечують безпечний і зручний рух для всіх.

Наведемо коротке техніко-економічне обґрунтування ефективності розроблених інженерних рішень з розумними пішохідними переходами і перехрестями. Для цього визначимось із додатковими вкладеннями та ефектами [17].

Додаткові вкладення, у порівнянні з існуючими інженерними рішеннями, є дещо більшими і складатимуться із наступних категорій витрат:

- витрати (з врахуванням транспортно-заготівельних витрат) на закупівлю додаткового оснащення світлофорів (сенсорних датчиків, кріпильних елементів, системи обробки інформації тощо) – Z_1 ;
- витрати на монтаж і підключення додаткового оснащення світлофорів (сенсорних датчиків, кріпильних елементів, системи обробки інформації тощо) – Z_2 ;
- витрати на ремонт і обслуговування додаткового оснащення світлофорів (сенсорних датчиків, системи обробки інформації тощо) – Z_3 ;
- витрати на функціонування додаткового оснащення системи обробки інформації світлофорів – Z_4 .

Додатковий ефект поділятиметься на соціальний, екологічний та економічний [17]:

1. Соціальний ефект відображатиметься у скороченні смертності, отриманій кількості травм внаслідок зменшення кількості аварій і покращанні якості життя людей, а також у відсутності потреби у лікуванні та реабілітації внаслідок зменшення кількості аварій. Оцінка цього виду ефекту матиме якісну форму, позаяк не етично проводити її кількісну оцінку.

2. Екологічний ефект визначатиметься зменшенням шкідливих впливів у довкілля при скороченні простою транспортних засобів в режимі очікування на розумних пішохідних переходах і перехрестях. Оцінка даного виду ефекту матиме якісну форму, позаяк не можливо чи вкрай складно здійснити її кількісну оцінку.

3. Економічний ефект визначатиметься наступними складовими:

- економія палива, за рахунок скорочення простою транспортних засобів в режимі очікування на розумних пішохідних переходах і перехрестях – E_1 ;
- збільшення продуктивної праці водіїв, що опосередковано можна відобразити в економії їх заробітної плати за рахунок скорочення простою транспортних засобів в режимі очікування на розумних пішохідних переходах і перехрестях – E_2 ;
- підвищення ефективності використання транспортних засобів, що опосередковано можна відобразити в амортизаційних відрахуваннях за рахунок скорочення простою транспортних засобів в режимі очікування на розумних пішохідних переходах і перехрестях – E_3 ;
- додатковий ефект, що полягає у зменшенні тривалості простою пасажирів і вантажів – E_4 .

Визначення даних складових можливе лише з врахуванням особливостей та інтенсивності руху на кожній конкретній ділянці.

Отже, економічна доцільність оснащення пішохідних переходів і перехресть додатковими розумними засобами, які були викладені в [13, 15, 16], визначатиметься по кожній конкретній ділянці, виходячи із порівняння очікуваних економічних позитивів і додаткових вкладень, як:

$$E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \geq Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4. \quad (1)$$

Для більш детальних підрахунків необхідно проводити фіксацію кількості транспортних засобів і неефективний час їх простою на розумних пішохідних переходах і перехрестях, що дозволить визначити орієнтовний індекс прибутковості інвестицій у проекти, пов'язані із створенням розумних пішохідних переходів і перехресть:

$$P_i = \left(\sum_{t=0}^n \left(\left(\frac{Z_{np}}{T_p} \cdot k_{ne} + \frac{A_p + B_{ny}}{T_{eo}} \right) \cdot \Delta t \cdot n_1 \cdot n_2 \right) / (1+i)^t \right) / (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4), \quad (2)$$

де P_i – індекс прибутковості проєкту створення розумного пішохідного переходу чи перехрестя;

Z_{np} – усереднена річна заробітна плата шофера, грн.;

T_p – річний робочий час шофера, год.;

k_{ne} – коефіцієнт, що враховує додатковий ефект від зменшення тривалості простою пасажирів і вантажів, $k_{ne} = 1 \dots 3$;

A_p – усереднені річні відрахування по транспортному засобу, грн.;

B_{ny} – усереднена вартість палива, що витрачається транспортним засобом за рік, грн.;

T_p – усереднений річний час експлуатації транспортного засобу, год.;

Δt – усереднений на основі експериментальної фіксації час зменшення простою окремого транспортного засобу на розумному пішохідному переході чи перехресті, год.;

n_1 – кількість спрацювань (переключень) світлофорів на розумному пішохідному переході чи перехресті протягом року, шт.;

n_2 – кількість транспортних засобів, що одночасно зупиняються на розумному пішохідному переході чи перехресті, шт.;

i – ставка дисконтування;

t – номер року;

n – кількість років функціонування розумного пішохідного переходу чи перехрестя.

З врахуванням економічного обґрунтування, впровадження розумних пішохідних переходів і перехресть є перспективним рішенням, яке має потенціал підвищення рівня безпеки дорожнього руху, покращення екологічної ситуації та економічної ефективності транспортної інфраструктури. Таким чином, прийняття рішення щодо реалізації таких проєктів має базуватися на детальному техніко-економічному аналізі, що дозволить оптимізувати витрати, максимізувати отримані вигоди і сприятиме підвищенню ефективності міських перевезень.

Висновки. Результати дослідження підтверджують, що провадження розумних пішохідних переходів і перехресть сприяє зниженню рівня аварійності, а також безпосередньо впливає на зменшення смертності та травматизму серед учасників дорожнього руху. Відтак розроблені та обґрунтовані в роботі проєктні рішення сприяють зниженню рівня аварійності, дозволяють забезпечити скорочення часу простою транспортних засобів на розумних пішохідних переходах і перехрестях, що призводить до зменшення кількості викидів шкідливих речовин, витрат палива, підвищення продуктивності праці водіїв та покращення ефективності експлуатації транспортних засобів.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку економічно ефективних систем, їх інтеграцію в існуючу транспортну інфраструктуру та оцінку довгострокових наслідків використання таких технологій у великих містах. Для досягнення максимального ефекту необхідно проводити детальний аналіз інтенсивності руху, місцевих умов та перевірки ефективності очікуваних результатів перед впровадженням розумних пішохідних переходів і перехресть у міську інфраструктуру з врахуванням розроблених рекомендацій.

Список літератури

1. Ляшук О.Л., Міронов Д.В., Лисенко С.В., Гупка А.Б., Бодоряк Ю.Д., Статистичний аналіз дорожньо-транспортних пригод у Тернопільській області та заходи щодо зниження аварійності / Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 9(40), ч. II. С. 88-106.
2. Статистика ДТП в Україні. Патрульна поліція: веб-сайт. URL: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka>
3. Ляшук О.Л., Сташків М.Я., Цьонь О.П., Рожко Н.Я., Плекан У.М., Гевко Б.Р., Підвищення ефективності функціонування нерегульованого перехрестя з круговим рухом / Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39), ч. I. С. 219-229.
4. Gruden, C.; Ištoka Otković, I.; Šraml, M. Pedestrian safety at roundabouts: Their crossing and glance behavior in the interaction with vehicular traffic. *Accid. Anal. Prev.* 2021, 159, 106290.
5. Ренкас А.А., Руденко Д.В., Товарянський В.І., Підвищення ефективності функціонування перехресть з високоінтенсивними транспортними та пішохідними потоками / Вісник ЛДУБЖД. 2021. Вип. №23. С. 61-67.
6. Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки: ДСТУ 4092-2002. – [Чинний від 2003-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2002. – 27 с. – (Державний стандарт України).
7. Форнальчик Є. Ю. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах: монографія / Є. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. Е. Трушевський, В. В. Гілевич; за заг. ред Є. Ю. Форнальчика. – Львів :Видавництво Львівської політехніки, 2018. 236 с.
8. Організація та регулювання дорожнього руху: підручник / Бакуліч О.О. та ін.; за ред. В.П. Поліщука. Київ. 2014. 467 с.
9. Пономаренко Л.А. Управління нестационарними транспортними потоками на регульованих перехрестях : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.01 «Транспортні системи» / Любова Анатоліївна Пономаренко. – К., 2006. – 145 с.
10. Dorokhin, S.V., Zelikov, V.A., Denisov, G.A.: Improvement of road traffic safety in the zone of unsignalled pedestrian crossings. *Transp. Res. Procedia* 36, 122–128 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.053>
11. Бугайов І.С., Холодова О.О., Бугайова М.О. Оцінка ефективності впровадження засобів заспокоєння дорожнього руху на перехресті. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2023, №1 (20). С. 79-86.
12. Сенсорний нерегульований пішохідний перехід : пат. 139005 Україна ; опубл. 2019 р. Бюл. № 23.
13. Сенсорний нерегульований пішохідний перехід : пат. 152286 Україна, МПК G08G 1/09. № u 202202157 ; опубл. 12.01.2023. Бюл. № 2.
14. Безпечний регульований пішохідний перехід : пат. 1389125, Україна ; опубл. 2019 р. Бюл. № 23.
15. Сенсорний регульований пішохідний перехід з розумним світлофором : пат. 155001 Україна, МПК E01F13/04. № u 202302464 ; опубл. 10.01.2024. Бюл. № 2/2024.
16. Регульоване перехрестя з розумним світлофором : пат. 157321 Україна, МПК: E01F9/00, E01F9/658, G08G1/095, G06V20/58. № u202400166 ; опубл. 02.10.2024. Бюл. № 40/2024.
17. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень на СТО та АТП : Навчальний посібник / укладачі : Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Луциків І.В., Плекан У.М., Клендій В.М. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 276 с.

References

1. Liashuk, O.L., Mironov, D.V., Lysenko, S.V., Hupka, A.B., Bodoriak, Yu.D. (2024). Statystychnyi analiz dorozhn'o-transportnykh pryhod u Ternopils'kii oblasti ta zakhody shchodo znyzhennia avariinosti. *Tsentral'noukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 9(40), Pt. II, 88–106 [in Ukrainian].
2. Patrol'na politsiia. (n.d.). Statystyka DTP v Ukraini. <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka> [in Ukrainian].
3. Liashuk, O.L., Stashkiv, M.Ya., Ts'on', O.P., Rozhko, N.Ya., Plekan, U.M., Hevko, B.R. (2023). Pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia nerehul'ovanoho perekhrestia z kruhovym rukhom. *Tsentral'noukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39), Pt. I, 219–229 [in Ukrainian].
4. Gruden, C., Ištoka Otković, I., & Šraml, M. (2021). Pedestrian safety at roundabouts: Their crossing and glance behavior in the interaction with vehicular traffic. *Accident Analysis and Prevention*, 159, 106290. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106290>
5. Renkas, A.A., Rudenko, D.V., Tovarians'kyi, V.I. (2021). Pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia perekhrest' z vysokointensyvnymy transportnymy ta pishokhidnymy potokamy. *Visnyk LDUBZHD*, (23), 61–67 [in Ukrainian].
6. Derzhstandart Ukrainy. (2002). *Bezpeka dorozhnoho rukhu. Svitlofory dorozhni. Zahal'ni tekhnichni vymohy, pravyla zastosuvannia ta vymohy bezpeky (DSTU 4092–2002)*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
7. Fornal'chik, Ye.Yu., Mohyla, I.A., Trushevskiy, V.E., Hilevych, V.V. (2018). *Upravlinnia dorozhnym rukhom na rehul'ovanykh perekhrestiaakh u mistakh: monohrafiia*. Ye.Yu. Fornal'chik (Ed.). Lviv: Vydavnytstvo Lvivs'koï politekhniki [in Ukrainian].
8. Polishchuk, V.P. (Ed.). (2014). *Orhanizatsiia ta rehul'uvannia dorozhnoho rukhu: pidruchnyk*. Kyiv [in Ukrainian].

9. Ponomarenko, L.A. (2006). *Upravlinnia nestatsionarnymy transportnymy potokamy na rehul'ovanykh perekhrestiakh: dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.22.01 "Transportni systemy"*. Kyiv [in Ukrainian].
10. Dorokhin, S.V., Zelikov, V.A., Denisov, G.A. (2018). Improvement of road traffic safety in the zone of unsignalized pedestrian crossings. *Transportation Research Procedia*, 36, 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.053>
11. Buhaiov, I.S., Kholodova, O.O., Buhaiova, M.O. (2023). Otsinka efektyvnosti vprovadzhennia zasobiv zaspokoiennia dorozhnogo rukhu na perekhresti. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(20), 79–86 [in Ukrainian].
12. *Sensornyi nerekul'ovanyi pishokhidnyi perekhid*. Patent No. 139005, Ukraine. Bulletin No. 23, 2019 [in Ukrainian].
13. *Sensornyi nerekul'ovanyi pishokhidnyi perekhid*. Patent No. 152286, Ukraine. MPK G08G 1/09. No. u202202157; Published 12.01.2023. Bulletin No. 2 [in Ukrainian].
14. *Bezpechnyi rehul'ovanyi pishokhidnyi perekhid*. Patent No. 1389125, Ukraine. Bulletin No. 23, 2019 [in Ukrainian].
15. *Sensornyi rehul'ovanyi pishokhidnyi perekhid z rozumnym svitloforom*. Patent No. 155001, Ukraine. MPK E01F13/04. No. u202302464; Published 10.01.2024. Bulletin No. 2/2024 [in Ukrainian].
16. *Rehul'ovane perekhrestia z rozumnym svitloforom*. Patent No. 157321, Ukraine. MPK: E01F9/00, E01F9/658, G08G1/095, G06V20/58. No. u202400166; Published 02.10.2024. Bulletin No. 40/2024 [in Ukrainian].
17. Hevko, I.B., Liashuk, O.L., Lutsykyv, I.V., Plekan, U.M., Klendii, V.M. (2021). *Tekhniko-ekonomichne obhruntuvannia inshenernykh rishen' na STO ta ATP: navchal'nyi posibnyk*. Ternopil: Vyd-vo TNTU imeni Ivana Puliuia [in Ukrainian].

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Volodymyr Teslya**, PhD tech. sci., **Maria Sipravska**,

Bogdan Hevko, PhD econ. sci., **Roman Khoroshun**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

New Technologies for Enhancing Road Traffic Safety at Pedestrian Crossings and Signalized Intersections

Despite the implementation of various measures to improve road traffic safety, the accident rate at pedestrian crossings and signalized intersections remains high. The main causes include the human factor, ineffective traffic control, and insufficient use of modern technologies for monitoring and managing traffic flows.

Unsignalized pedestrian crossings often pose a high-risk area due to unpredictable pedestrian and driver behavior, as well as poor visibility in adverse weather conditions. Signalized crossings and intersections also have drawbacks, particularly a lack of adaptability to traffic flow changes, which can lead to inefficient waiting times for both pedestrians and vehicles.

Therefore, there is a need for research and implementation of new intelligent transport systems capable of analyzing real-time road conditions, adjusting traffic light operations, and improving safety for all road users.

This study examines ways to enhance the efficiency and safety of road traffic through the introduction of new technologies in pedestrian crossing management and traffic flow regulation. The research focuses on the effectiveness of sensor-based unsignalized pedestrian crossings, sensor-controlled crossings with intelligent traffic lights, and signalized intersections equipped with adaptive traffic light systems. Their impact on accident reduction and improved traffic organization is analyzed. Practical recommendations for integrating these technologies into urban infrastructure are provided.

The increasing number of vehicles and traffic intensity in urban areas contribute to a rise in accident rates, particularly at pedestrian crossings and regulated intersections. Traditional traffic control methods are not always effective as they fail to account for dynamic traffic flow changes and behavioral patterns of road users. Implementing intelligent transport systems can significantly improve the situation by enabling automated traffic management using advanced technologies.

The objective of this study is to analyze and assess the efficiency of sensor-based unsignalized pedestrian crossings, sensor-controlled regulated crossings with intelligent traffic lights, and signalized intersections with adaptive traffic light systems.

The research confirms that the implementation of smart pedestrian crossings and intersections contributes to a reduction in accident rates and directly impacts the decrease in mortality and injuries among road users. The proposed project solutions developed in this study help lower accident rates, reduce vehicle idle time at smart pedestrian crossings and intersections, decrease harmful emissions and fuel consumption, enhance driver productivity, and improve the overall efficiency of vehicle operations.

Further studies should focus on developing cost-effective systems, integrating them into existing transport infrastructure, and evaluating the long-term effects of such technologies in large cities. To maximize effectiveness, detailed traffic flow analyses, local conditions assessments, and pre-implementation evaluations of expected outcomes should be conducted to ensure optimal deployment of smart pedestrian crossings and intersections in urban infrastructure.

transport systems, road traffic safety, intelligent traffic lights, sensor-controlled pedestrian crossings, adaptive traffic regulation

Одержано (Received) 07.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 23.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025

УДК 656.07:005.334

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.278-285](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.278-285)

Д. О. Кульова, д-р філос., С. О. Магопєць, доц., канд. техн. наук,
О. М. Лівіцький, канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: d.coolava@gmail.com, magserg@ukr.net, Livitskyi885@gmail.com*

Безпека дорожнього руху в Україні: оцінювання ризиків і перспективи цифровізації

У статті проведено оцінювання ризиків порушень безпеки дорожнього руху, які є передумовами виникнення дорожньо-транспортних пригод з вини водіїв. Особливу увагу приділено ролі технічного розслідування та автотехнічної експертизи як інструментів виявлення джерел ризиків і формування превентивних заходів. Результати ранжування на основі частоти подій і експертної оцінки тяжкості наслідків дозволили виокремити найбільш критичні порушення, що потребують першочергової уваги з боку системи управління дорожнім рухом. Запропоновано рекомендації щодо впровадження сучасних смарт-технологій з метою зниження рівня ризиків. Обґрунтовано доцільність впровадження проактивного підходу до забезпечення безпеки дорожнього руху, з урахуванням сучасних викликів та обмежень, характерних для транспортної системи України.

ризик, показники ризику, безпека дорожнього руху, смарт-технології, експертиза дорожньо-транспортних пригод

Постановка проблеми. Безпека перевезень на автомобільному транспорті є одним із ключових чинників забезпечення стабільного функціонування транспортної системи України. Незважаючи на розробку і впровадження системних заходів державної політики у сфері безпеки на транспорті, стан аварійності на автомобільному транспорті залишається складним.

За даними Державної служби України з безпеки на транспорті (Укртрансбезпека), у 2024 році на автошляхах України сталося 3532 дорожньо-транспортні пригоди (ДТП) за участю ліцензованого автомобільного транспорту, що надає послуги з перевезення пасажирів та вантажів в т.ч. небезпечних, а також здійснює міжнародні перевезення [1]. Внаслідок зазначених ДТП загинуло 186 осіб, ще 1127 отримали травми. У порівнянні з 2023 роком кількість ДТП зросла на 25,3 %, кількість загиблих збільшилась на 12 %, а кількість травмованих – на 18,6 %.

Найбільшу частку у кількості аварійних подій здійснили водії вантажних автомобілів, що перевозили небезпечні вантажі (зростання ДТП на 62,4 %). Також виявлено, що понад 56 % аварійних подій сталися з транспортними засобами (ТЗ), період експлуатації яких перевищує 10 років, що свідчить про важливість оновлення рухомого складу та контролю його технічного стану.

У зв'язку з цим актуальним є впровадження системного ризик-орієнтованого підходу до аналізу та управління безпекою автомобільних перевезень і розробка сучасних смарт-технологій, що дозволять своєчасно виявляти, оцінювати і мінімізувати ризики ДТП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Управління ризиками в сфері транспорту є одним із пріоритетних напрямів наукових досліджень [2-4]. Зростання ДТП з вини водіїв вантажних автомобілів під час перевезення небезпечних вантажів показують необхідність впровадження системно-направленого підходу [5-7] до управління ризиками, оскільки наслідки в результаті аварійних подій з такими вантажами, завжди мають більш серйозний характер. Робота [3] присвячена оцінюванню

ризиків перевезення нафтопродуктів з точки зору їх схоронності. Визначено, що ризик витоку нафтопродуктів через механічні пошкодження цистерни спричинені ДТП, посідає друге місце серед семи ідентифікованих ризиків несхоронних перевезень, що свідчить про високий рівень потенційної небезпеки даного чинника та необхідність його врахування під час розроблення заходів з управління ризиками, пов'язаними із забезпеченням безпеки перевізного процесу з небезпечними вантажами.

У сучасних дослідженнях розглядаються різноманітні аспекти аварійності на транспорті, що охоплюють технічний стан ТЗ [8], вплив людського фактору [9], якість дорожньої інфраструктури, ефективність нормативно-правового регулювання [10]. Вони формують умови безпечного функціонування транспортної системи. Наявність недоліків вищезазначених аспектів створює потенційні ризики для перевізного процесу. Це, у свою чергу, зумовлює потребу у використанні сучасних методів їх ідентифікації, оцінювання та управління. У зв'язку з цим, особливу увагу науковці приділяють удосконаленню методів аналізу ризиків на основі статистичних моделей, побудови матриць ризиків [8 11] та застосування методів багатофакторного аналізу [9], оскільки ці інструменти дозволяють системно оцінювати ризики, враховуючи широкий спектр чинників, які на них впливають.

Зокрема в роботі [12] розроблено методологію вибору оптимального маршруту для перевезення небезпечних вантажів з урахуванням двох груп критеріїв ризику: імовірності виникнення надзвичайних ситуацій та складності ліквідації їх можливих наслідків. В дослідженні використовуються формалізовані алгоритми оцінювання ризиків, експертні методи ранжування критеріїв безпеки на маршруті, а також багатокритеріальні підходи до вибору найбільш безпечного маршруту. Цей підхід може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень при плануванні безпечних логістичних маршрутів. Наступним етапом розвитку таких рішень є впровадження смарт-технологій, що забезпечують автоматизований збір даних, їхню обробку та оперативне реагування на ризикові фактори в режимі реального часу [13].

На сьогоднішній день розробка і застосування смарт-технологій в сфері безпеки дорожнього руху (БДР) розглядається як перспективний напрям розвитку транспортної галузі. Серед ключових рішень цифровізації перевізного процесу виділяють застосування інтелектуальних транспортних систем (Intelligent Transportation Systems), телематики (Telematics), Інтернету речей (Internet of Things, IoT), штучного інтелекту (Artificial Intelligence) та автоматизованого моніторингу технічного стану ТЗ (Vehicle Health Monitoring Systems) і поведінки водіїв (Driver Monitoring Systems), що стає невід'ємною частиною розвитку концепції смарт-міст із безпечною та інтегрованою транспортною інфраструктурою [14, 15].

Метою роботи є оцінювання типових ризиків порушень безпеки дорожнього руху з боку водіїв автомобільного транспорту з визначенням їх пріоритетності та формуванням пропозицій щодо впровадження заходів управління ними.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

- провести ідентифікацію основних типових порушень безпеки дорожнього руху водіями транспортних засобів, що призводять до дорожньо-транспортних пригод;
- оцінити ризики безпеки дорожнього руху, пов'язаних з водіями, на основі відносної частоти подій та сумарної експертної оцінки тяжкості їх наслідків;
- сформулювати рекомендації щодо застосування смарт-технологій для мінімізації оцінених ризиків.

Виклад основного матеріалу. Одним із важливих інформаційних ресурсів для загального оцінювання ризиків в сфері дорожнього руху (ДР) – є результати технічного розслідування ДТП, катастроф, аварій на автомобільному та міському електричному

(трамвай, тролейбус) транспорті. Розслідування дозволяють визначити джерела ризиків, проаналізувати системні помилки в організації ДР, вплив технічного стану ТЗ та дії водіїв.

Розслідування проводиться комісією, утвореною центральним органом виконавчої влади, який забезпечує реалізацію державної політики з питань безпеки на наземному транспорті, або його територіальним органом за місцем події. Строк проведення розслідування становить 30 діб з моменту створення комісії, з можливістю продовження за необхідності.

Комісія працює за планом, який передбачає основні напрями діяльності, строки виконання завдань та призначення відповідальних виконавців. Проект плану розглядається на організаційному засіданні комісії та затверджується її головою. До складу комісії, за необхідності, можуть додатково залучатися експерти, фахівці, вчені, спеціалісти центральних і місцевих органів виконавчої влади. Процедура включає збір і аналіз інформації щодо технічного, організаційного стану перевізного процесу.

У межах розслідування ДТП, у разі потреби, може призначатися технічна експертиза. Така експертиза є процедурою, що проводиться з метою встановлення технічних причин ДТП, механізму її виникнення, відповідності дій учасників ДР вимогам Правил дорожнього руху та можливості запобігання події. Порядок призначення та проведення таких експертиз регулюється Законом України «Про судову експертизу», Кримінальним процесуальним кодексом України, а також Інструкцією про призначення та проведення судових експертиз та експертних досліджень, затвердженою наказом Міністерства юстиції України № 53/5. Автотехнічна експертиза може бути як частиною державного розслідування ДТП, так і окремою дією в межах досудового розслідування або судового процесу. Її результати мають доказове значення та можуть впливати як на висновки комісії, так і на прийняття правових рішень щодо винуватості учасників події.

За результатами розслідування складається офіційний акт, висновки з якого стають підґрунтям для розробки превентивних заходів, спрямованих на зменшення аварійності, удосконалення нормативно-правових вимог і підвищення ефективності функціонування системи управління безпекою на транспорті.

Рекомендації комісії базуються на аналізі виявлених відхилень у функціонуванні дорожньо-транспортної системи та систем управління безпекою руху. Ці відхилення безпосередньо не вплинули на конкретну подію, але становлять загрозу, тобто є фактичними і потенційними ризиками. Серед ключових напрямів превенції можливо виділити наступні: удосконалення вимог до технічного стану ТЗ, технічних засобів, організації ДР та конструктивних елементів автомобільної дороги; утримання ТЗ, а також інших об'єктів автомобільного транспорту в належному технічному стані та забезпечення проведення їх державного технічного огляду в установленому порядку; удосконалення систем підготовки персоналу, діяльність яких пов'язана з перевезенням пасажирів і вантажів та водіїв. У разі виявлення системних проблем, комісія може також ініціювати зміни до чинних нормативно-правових актів та пропонувати організаційно-технічні рішення для мінімізації виявлених ризиків.

Поряд із висновками, що формуються на основі технічних розслідувань ДТП, важливим джерелом ідентифікації ризиків в сфері ДР залишаються статистичні дані. Вони дозволяють виявити домінуючі типи порушень БДР, їх частоту, що є основою для кількісного оцінювання ризиків.

У звіті про стан безпеки руху та аварійності на наземному транспорті в Україні за 2024 рік, ДТП класифіковано за різними критеріями: передумови виникнення; маршрути руху ТЗ; пора доби; вид події; період експлуатації ТЗ; кількість загиблих

учасників ДР. Однак з огляду на мету дослідження виявлення та оцінювання ризиків, що порушують БДР, доцільним є формування узагальненого переліку типових небезпечних ситуацій, які стали передумовами виникнення ДТП з вини водіїв.

Для оцінювання ризиків, пов'язаних із типовими порушеннями БДР, використано кількісний підхід, що передбачає застосування виразів, які враховують частоту виникнення подій та умовний коефіцієнт тяжкості наслідків.

Частота виникнення i -го виду порушення БДР розраховується наступним чином:

$$\psi_i = \frac{N_i}{N_{\text{заг}}}, \quad (1)$$

де ψ_i – частота виникнення i -го типу порушення у загальній структурі ДТП;

N_i – кількість випадків i -го типу порушення у звітному році;

$N_{\text{заг}}$ – загальна кількість ДТП у звітному році.

Ризик порушення БДР розраховується за формулою:

$$R_i = \psi_i \cdot Y_i, \quad (2)$$

де Y_i – умовний коефіцієнт тяжкості наслідків i -го типу порушення.

Для кожного типового порушення БДР застосовано умовний коефіцієнт тяжкості наслідків Y_i , визначений експертним методом за шкалою від 1 до 10. Даний коефіцієнт відображає інтегральну оцінку тяжкості наслідків з урахуванням трьох основних складових: загибелі або травмування учасників ДР, матеріальних збитків (пошкодження ТЗ, вантажу або елементів дорожньої інфраструктури), а також порушення безперервності перевізного процесу (затримки, збої, блокування руху). Цей показник визначається за формулою:

$$Y_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Y_{ij}, \quad (3)$$

де m – кількість експертів;

Y_{ij} – інтегральна оцінка j -м експертом для i -го порушення:

$$Y_{ij} = \frac{w_1 \cdot A_{ij} + w_2 \cdot B_{ij} + w_3 \cdot C_{ij}}{w_1 + w_2 + w_3}, \quad (4)$$

де A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} – оцінки за відповідними критеріями, виставлені j -м експертом для i -го порушення;

w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти критеріїв.

Для наочного уявлення результату оцінених ризиків R_i ранжуються в порядку спадання величини:

$$[R_1, R_2, \dots, R_n], \quad (5)$$

де $R_1 \geq R_2 \geq \dots \geq R_n$.

Результати оцінювання показників ризиків зведено в табл. 1.

Аналіз наведених показників (табл. 1) свідчить про те, що найбільш критичними порушеннями БДР є: порушення правил маневрування 3,271; недотримання дистанції та інтервалу руху 2,203; перевищення швидкості руху 1,679. Дані порушення мають найбільші значення ризику і потребують першочергового впровадження інноваційних рішень для зниження їх рівня. Водночас найменші значення ризику зафіксовано для таких порушень: сон за кермом 0,004; керування у нетверезому стані 0,004 та порушення правил проїзду залізничних переїздів 0,003. Попри низьку частоту, ці

порушення характеризуються високою потенційною небезпекою, а тому також потребують впровадження відповідних заходів для зниження загального рівня ризику.

Таблиця 1 – Результати оцінювання показників типових порушень безпеки дорожнього руху

№ з/п	Типові порушення безпеки дорожнього руху	Частота порушень (ψ_i)	Інтегральна оцінка тяжкості наслідків (Y)	Ризик порушення безпеки дорожнього руху (R_i)
1	Порушення правил маневрування	0,399	8,2	3,271
2	Недотримання дистанції та інтервалу руху	0,290	7,6	2,203
3	Перевищення швидкості руху	0,227	7,4	1,679
4	Порушення правил проїзду перехресть	0,039	6,2	0,241
5	Порушення правил обгону та/або виїзду на смугу зустрічного руху	0,024	6,4	0,153
6	Експлуатація технічно несправних транспортних засобів	0,012	5,4	0,064
7	Порушення правил проїзду зупинок громадського транспорту	0,006	5,2	0,031
8	Сон за кермом	0,001	4,6	0,004
9	Керування у нетверезому стані	0,001	4,0	0,004
10	Порушення правил проїзду залізничних переїздів	0,001	3,2	0,003

Джерело: розроблено авторами

З метою зменшення ризиків, пов'язаних із найпоширенішими порушеннями безпеки дорожнього руху, доцільним є впровадження смарт-технологій, здатних запобігати виникненню критичних ситуацій або мінімізувати їх наслідки. Так, для порушення правил маневрування ефективними є системи допомоги при зміні смуги (Lane Keeping Assist), камери кругового огляду та інтелектуальні сенсори, що дозволяють водію краще орієнтуватися в просторі. У випадках недотримання дистанції доцільним є впровадження адаптивного круїз-контролю (Adaptive Cruise Control) та систем попередження про небезпеку зіткнення (Forward Collision Warning System), які в режимі реального часу оцінюють ситуацію на дорозі та втручаються в керування.

Для боротьби з перевищенням швидкості доцільно використовувати інтелектуальні обмежувачі швидкості (Intelligent Speed Assistance), які синхронізуються з GPS-даними та дорожніми знаками, автоматично коригуючи швидкість руху. Порушення правил проїзду перехресть можна мінімізувати завдяки V2I-комунікаціям (Vehicle-to-Infrastructure), які забезпечують обмін інформацією між транспортними засобами та світлофорами, а також системам попередження про небезпечні перехрестя (Intersection Collision Warning System).

Для зменшення кількості ДТП, спричинених порушенням правил обгону або виїздом на зустрічну смугу, доцільним є застосування систем виявлення мертвих зон (Blind Spot Detection) та утримання в смузі з функцією попередження. Проблему експлуатації технічно несправних транспортних засобів можуть вирішити вбудовані IoT-датчики, які контролюють ключові параметри ТЗ, зокрема гальмівну систему, тиск у шинах, стан освітлення, а також предиктивне обслуговування, що дозволяє виявити несправності ще до їх критичного прояву.

Порушення правил проїзду зупинок громадського транспорту можна зменшити завдяки системам розпізнавання зупинок із автоматичним сповільненням руху та камерам, що виявляють присутність пішоходів. У випадках керування у стані втоми ефективними є системи моніторингу уваги водія (Driver Drowsiness Detection), які аналізують рух очей, положення голови та стиль керування, запобігаючи втраті контролю.

Аналогічно, для запобігання керуванню у нетверезому стані можуть використовуватись алкозамки, а також аналіз поведінки водія на основі цифрових профілів.

Особливу увагу слід приділити переїздам через залізничні колії – інтеграція V2X-технологій (Vehicle-to-Everything) і систем попередження про наближення поїздів забезпечить своєчасне інформування водіїв і автоматичне блокування руху на небезпечній ділянці.

Інтеграція смарт-технологій у систему управління дорожнім рухом створює підґрунтя для формування проактивного підходу до безпеки, дозволяючи не лише реагувати на наслідки порушень, а й своєчасно запобігати їм. Водночас слід враховувати, що впровадження таких технологічних рішень в Україні потребує модернізації дорожньої мережі, забезпечення належної технічної бази та адаптацію нормативної бази. Проте навіть часткова реалізація зазначених рішень може суттєво знизити рівень ризиків і сприяти підвищенню загальної безпеки на автошляхах.

Висновки

1. Визначено роль технічного розслідування та автотехнічної експертизи дорожньо-транспортних пригод як ключових інструментів в аналізі причин аварійних подій, виявленні джерел ризиків та формуванні обґрунтованих заходів підвищення безпеки дорожнього руху.

2. Наведено ідентифікацію ризиків типових порушень в безпеці дорожнього руху й визначено передумови виникнення дорожньо-транспортних пригод з вини водіїв.

3. Здійснено оцінювання ризиків на основі частоти подій та експертної оцінки тяжкості їх наслідків. Визначено, що найбільшу величину ризику мають: порушення правил маневрування; недотримання дистанції та інтервалу руху; перевищення швидкості руху. Найменші значення ризику зафіксовано для таких порушень: сон за кермом; керування у нетверезому стані; порушення правил проїзду залізничних переїздів. Незважаючи на те, що ці порушення мають низьку частоту, вони характеризуються високим рівнем потенційної небезпеки, що потребує розробки заходів мінімізації рівнів ризиків.

4. Результати дослідження дали можливість запропонувати рекомендації щодо мінімізації оцінених ризиків з застосуванням смарт-технологій, таких як адаптивні системи круїз-контролю (Adaptive Cruise Control), системи попередження про небезпеку зіткнення (Forward Collision Warning System), інтелектуальні обмежувачі швидкості (Intelligent Speed Assistance), системи допомоги при зміні смуги (Lane Keeping Assist), системи виявлення мертвих зон (Blind Spot Detection), системи моніторингу уваги водія (Driver Drowsiness Detection), алкозамки, телематичні рішення для контролю технічного стану транспортного засобу, а також інтеграція V2X технологій. Реалізація таких рішень дозволить підвищити рівень управління дорожнім рухом, в тому числі і його безпекою.

Список літератури

1. Аналіз стану безпеки руху та аварійності на наземному транспорті в Україні за 2024 рік. Київ: Державна служба України з безпеки на транспорті. 2024. 46 с.
2. Кульова Д.О. Застосування концептуального підходу ризик-менеджменту в сфері безпеки руху на транспорті. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 10(41), ч.І. С. 261-269. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.261-269](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.261-269)
3. Аулін В.В., Кульова Д.О., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Оцінювання ризиків несхоронних перевезень нафтопродуктів автомобільним транспортом. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 10(41), ч. II, С. 205-213. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.205-213](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.205-213)
4. Masár M., Hudáková M., Šimák L., Brezina D. The current state of project risk management in the transport sector. Proceedings of the 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport (TRANSCOM 2019) (High Tatras, Nový Smokovec Slovak Republic, May 29–31, 2019). Transportation Research Procedia. 2019. Vol. 40. P. 1119–1126. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.156.

5. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замуренко А.С., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Дьяченко В.О. Теоретичний системно-спрямований підхід до визначення інтегрального показника ефективності реалізації операцій в транспортних системах. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2021. Вип. 4 (35), С. 232-247. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).232-247](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).232-247)
6. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Лівіцький О.М., Чернай А.Є., Голуб Д.В., Головатий А.О. Теоретичне обґрунтування управління функціонуванням технічними та транспортними системами на основі методів системної теорії інформації. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2021. Вип. 4 (35), С. 178-189. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).178-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).178-189)
7. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Лівіцький О.М., Головатий А.О. Системно-спрямований підхід до формування інтелектуальної системитехнічного сервісу. «Крамаровські читання»: збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 25-26 лютого 2021 р.) Київ/НУБіП. К.: Видавничий центр НУБіП України. 2021. С. 25-32.
8. Gorzelańczyk P., Kliszewski Ł., Piątkowski P. Analysis of the impact of the technical condition of vehicles on road safety. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. 2023. Vol. 100, № 2. P. 62–74. DOI: <https://doi.org/10.14669/AM/168680>
9. Ghandour A. J., Hammoud H., Al-Hajj S. Analyzing factors associated with fatal road crashes: A machine learning approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, No. 11. Article No. 4111. P. 1-13. DOI: [10.3390/ijerph17114111](https://doi.org/10.3390/ijerph17114111)
10. Akbari M., Heydari S.T., Razzaghi A., Vali M., Tabrizi R., Bagheri Lankarani K. Effectiveness of interventions for preventing road traffic injuries: A systematic review in low-, middle- and high-income countries. *PLOS ONE*. 2024. Vol. 19, № 12. P. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0312428>
11. Аулін В.В., Кульова Д.О., Варваров В.В. Виявлення, аналіз і прогнозування параметрів ризику безвідмовного навантаження готової продукції на транспортно-логістичному терміналі підприємства. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч.І. С. 263-271.
12. Pustiulha S., Samchuk V., Holovachuk I., Prydiuk V., Klak Y. Methodology for selecting optimal routes for the transportation of dangerous goods in conditions of risk uncertainty. *Transport and Telecommunication*. 2024. Vol. 25, № 2. P. 150–160. DOI: [10.2478/ttj-2024-0011](https://doi.org/10.2478/ttj-2024-0011)
13. Huang X., Wang B., Wu C. Realizing Smart Safety Management in the Era of Safety 4.0: A New Method towards Sustainable Safety. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 21. P. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142113915>
14. Bhattacharya S., Jha H., Nanda R. Application of IoT and Artificial Intelligence in Road Safety. *Proceedings of the 2022 IEEE International Conference (Kolkata, India February 24–26, 2022) Interdisciplinary Research in Technology and Management (IRTM)*. 2022. P. 1-5. DOI: [10.1109/IRTM54583.2022.9791529](https://doi.org/10.1109/IRTM54583.2022.9791529)
15. Bhargavi J., Ashwin B., Tagore L. Smart City Transportation Deep Learning Ensemble Approach for Traffic Accident Detection. *International Scientific Journal of Engineering and Management*. Vol. 4, Issue 2. 2025. P. 1-4. DOI: [10.55041/ISJEM02270](https://doi.org/10.55041/ISJEM02270)
16. Про затвердження Порядку технічного розслідування дорожньо-транспортних пригод, катастроф, аварій на автомобільному та міському електричному (трамвай, тролейбус) транспорті: наказ Міністерство інфраструктури України від 23 червня 2015 р. № 231. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0818-15#Text> (дата звернення: 29 квітня 2025).

References

1. State Service of Ukraine for Transport Safety. (2024). *Analysis of the state of traffic safety and accident rate on land transport in Ukraine for 2024*. Kyiv: State Service of Ukraine for Transport Safety [in Ukrainian].
2. Kulova, D. (2024). Application of the conceptual approach of risk management in the field of traffic safety in transport. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, (10)41(1), 261–269. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.261-269](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.261-269)
3. Aulin, V., Kulova, D., Hryniv, A., & Lysenko, S. (2024). Risk assessment of insecure transportation of petroleum products by road transport. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, (10)41(2), 205–213. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.205-213](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.205-213)
4. Masár, M., Hudáková, M., Šimák, L., & Brezina, D. (2019). The current state of project risk management in the transport sector. *Transportation Research Procedia*, 40, 1119–1126. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.156>
5. Aulin, V., Holub, D., Zamurenko, A., Hryniv, A., Lysenko, S., & D'iachenko, V. (2021). Theoretical system-oriented approach to determining the integral indicator of operational efficiency in transport systems. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, (4)35, 232–247. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).232-247](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).232-247)
6. Aulin, V., Hryniv, A., Lysenko, S., Lvivytskyi, O., Chernai, A., Holub, D., & Holovaty, A. (2021). Theoretical substantiation of managing the functioning of technical and transport systems based on methods of systems information theory. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, (4)35, 178–189. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).178-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).178-189)
7. Aulin, V. V., Hryniv, A. V., Lysenko, S. V., Lvivytskyi, O. M., & Holovaty, A. O. (2021). System-oriented

- approach to the formation of an intelligent system-technical service. In *Kramarovski readings: Materials of the 8th International Scientific and Technical Conference* (pp. 25–32). Kyiv: Publishing Center of NUBiP of Ukraine. [in Ukrainian].
8. Gorzelańczyk, P., Kliszewski, Ł., & Piątkowski, P. (2023). Analysis of the impact of the technical condition of vehicles on road safety. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 100(2), 62–74. [in English]. <https://doi.org/10.14669/AM/168680>
 9. Ghandour, A. J., Hammoud, H., & Al-Hajj, S. (2020). Analyzing factors associated with fatal road crashes: A machine learning approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), Article 4111, 1–13. [in English]. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114111>
 10. Akbari, M., Heydari, S. T., Razzaghi, A., Vali, M., Tabrizi, R., & Bagheri Lankarani, K. (2024). Effectiveness of interventions for preventing road traffic injuries: A systematic review in low-, middle-, and high-income countries. *PLOS ONE*, 19(12), 1–16. [in English]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0312428>
 11. Aulin, V. V., Kulova, D. O., & Varvarov, V. V. (2025). Identification, Analysis, and forecasting of failure-free loading risk parameters for finished products at a transport and logistics terminal Central Ukrainian Scientific Bulletin. *Technical Sciences*, 11(42)(1), 263–271. [in Ukrainian].
 12. Pustiulha, S., Samchuk, V., Holovachuk, I., Prydiuk, V., & Klak, Y. (2024). Methodology for selecting optimal routes for the transportation of dangerous goods in conditions of risk uncertainty. *Transport and Telecommunication*, 25(2), 150–160. [in English]. <https://doi.org/10.2478/tjt-2024-0011>
 13. Huang, X., Wang, B., & Wu, C. (2022). Realizing smart safety management in the era of Safety 4.0: A new method towards sustainable safety. *Sustainability*, 14(21), 1–21. [in English]. <https://doi.org/10.3390/su142113915>
 14. Bhattacharya, S., Jha, H., & Nanda, R. (2022). Application of IoT and artificial intelligence in road safety. In *Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Interdisciplinary Research in Technology and Management (IRTM)* (Kolkata, India, February 24–26, 2022) (pp. 1–5). IEEE. [in English]. <https://doi.org/10.1109/IRTM54583.2022.9791529>
 15. Bhargavi, J., Ashwin, B., & Tagore, L. (2025). Smart city transportation deep learning ensemble approach for traffic accident detection. *International Scientific Journal of Engineering and Management*, 4(2), 1–4. [in English]. <https://doi.org/10.55041/ISJEM02270>
 16. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2015). *On approval of the Procedure for technical investigation of road traffic accidents, catastrophes, and incidents on road and urban electric transport (trams, trolleybuses): Order No. 231, June 23, 2015*. Retrieved April 29, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0818-15#Text> [in Ukrainian].

Daria Kulova, PhD tech. sci., **Sergiy Mahopets**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Livitskyi**, Ph.D tech. sci. Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Road Safety in Ukraine: Risk Assessment and Digitalization Prospects

The article presents a risk assessment of road safety violations that serve as prerequisites for the occurrence of road traffic accidents caused by drivers. Particular attention is given to the role of technical investigation and automotive forensic analysis as tools for identifying sources of risk and developing preventive measures. The results of ranking based on event frequency and expert assessment of consequence severity allowed the identification of the most critical violations requiring priority attention from the traffic management system. These include: violation of maneuvering rules 3.271; failure to maintain distance and safe intervals 2.203; and speeding 1.679. Meanwhile, the lowest risk values were recorded for: falling asleep while driving 0.004; driving under the influence of alcohol 0.004; and violation of railway crossing rules 0.003. Despite their low frequency, these violations are characterized by high potential danger and therefore also require the implementation of appropriate risk reduction measures.

Recommendations are proposed for the implementation of modern smart technologies to reduce the risk levels of each typical violation, including Adaptive Cruise Control, Forward Collision Warning System, Intelligent Speed Assistance, Lane Keeping Assist, Blind Spot Detection, Driver Drowsiness Detection, alcohol interlocks, telematics solutions for vehicle condition monitoring, as well as the integration of V2X (Vehicle-to-Everything) technologies. The implementation of such solutions will enhance traffic management, including its safety aspect.

The article substantiates the relevance of a proactive approach to road safety management, taking into account the current challenges and limitations specific to the Ukrainian transport system.

risk, risk indicators, road safety, smart technologies, traffic accident expertise

Одержано (Received) 14.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 16.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

УДК 62-11; 504: 629.3/656.11 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.286-297](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.286-297)Е. Д. Ладизенський¹, В. П. Петленко², А. В. Гриньків², *ст. дослідник, канд. техн. наук*¹ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”, м. Дніпро, Україна²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: ladizenskiy@gmail.com, Tpetlenko@ukr.net, AVGrinkiv@gmail.com

Підвищення рівня екологічності транспортних перевезень на засадах інтелектуалізації транспортних систем

Публікацію присвячено дослідженню можливостей застосування інтелектуальних транспортних систем для підвищення рівня екологічності транспортних перевезень в умовах прискореного розгортання цифрової трансформації в країні. Підвищення екологічності на засадах використання інтелектуальних транспортних систем обґрунтовано необхідністю забезпечення стандартів якості реалізації логістичних процесів у контексті сталого розвитку транспортних підприємств, які формуються з точки зору захисту навколишнього середовища. Представлено детальний аналітичний огляд напрямів оптимізації використання інтелектуальних транспортних систем, що сприяють мінімізації негативного впливу логістичних процесів на локальне навколишнє середовище **шкідливи викиди, екологічність транспортних перевезень, інтелектуальні транспортні системи**

Постановка проблеми. Поширення засад функціонування цифрової трансформації породило нові можливості для транспортних підприємств впритул наблизитись до кардинального та ефективного розв'язання нагальних проблем їх діяльності, одними з найважливіших серед яких є екологічні. У процесі забезпечення основної діяльності транспортних підприємств відбувається негативний вплив транспортних засобів на навколишнє середовище за такими напрямками: глобальне потепління і як наслідок довгостроковий вплив на клімат викидів діоксидів карбону (CO_2) та нітрогену (NO_2), метану (CH_4), хлорфлюокарбону (CFCs), гідрохлорфлюокарбону (HCFCs), метилброміду (CH_3Br); глобальне виснаження озону у стратосфері (за рахунок викидів CFCs, HCFCs, CH_3Br), регіонального та локального окислення, що викликане спалюванням пального (оксиди сірки SO_x (діоксид сірки SO_2 та триоксид сірки SO_3), оксиди азоту NO_x (оксид азоту NO та діоксид азоту NO_2), соляна кислота (HCl), плавикова кислота (HF), аміак (NH_3)); локальне виснаження розчиненого у воді кисню за рахунок забруднення води поживними речовинами для цвітіння водоростей і росту бактерій (фосфат (PO_4), оксид азоту (NO), діоксид азоту (NO_2), нітрат аміаку (NH_4)); локальне поширення фотохімічного смогу неметанового вуглеводню (NMHC); локальне підвищення рівня токсичності верхнього шару землі (зі смертельною концентрацією для гризунів) під впливом хімікатів, те ж само шарів води зі смертельною концентрацією для риби; глобальні, регіональні та локальні загрози здоров'ю людини під впливом викидів у повітря, воду та ґрунт; глобальне, регіональне та місцеве виснаження ресурсів як наслідок видобування мінералів та використання палива; глобальне, регіональне та місцеве погіршення стану земельних ресурсів за рахунок створення звалищ або інших негативних змін ландшафту; регіональні та локальні наслідки формування дефіциту води, що придатна для безпечного споживання [16]. Важлива роль у подоланні негативних ефектів, що формуються протягом тривалості життєвого циклу транспортного підприємства, відводиться системі заходів щодо підвищення рівня екологічності транспортних перевезень. Нові горизонти на шляху підвищення рівня екологічності транспортних перевезень відкривають можливості використання інтелектуальної транспортної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення рівня екологічності корпоративних транспортних перевезень на основі використання ІТС постійно перебуває у фокусі наукових інтересів дослідників в цілому, так і фахівців більш вузьких галузей корпоративної діяльності, а саме транспортних технологій та розвитку ІТС. Масштабні дослідження колективів вітчизняних науковців під керівництвом Бакуліч О. [2], у складі Антошкіної Л., Біляєва М., Коренюк Є., Хрущ В. К. [1; 3], Линник І., Лежневої О., Дорожко Є. та ін. [4], Олійника Я. [5], Schönsleben P. [17], що виконані з загальних позицій організації логістичних процесів, у поєднанні зі спеціальними дослідженнями у сфері забезпечення екологічних стандартів діяльності Європейської комісії [9; 11-13], нарешті створюють можливості для вирішення проблем гармонізації донедавна суперечливих цілей природоохоронної діяльності на рівні теорії. Одночасно, бажана гармонізація прискорюється за рахунок використання практичних конструкторських рішень для упередження можливих екологічних проблем вже на стадіях проектування ТЗ, що висвітлюють в своїх дослідженнях провідні екодизайнери Baldwin C.Y. & Clark K.B [7; 8], Ericsson A. & Erixon G. [10], Trancossi M. [188].

Постановка завдання. Метою дослідження є встановлення можливостей застосування інтелектуальних транспортних систем для підвищення рівня екологічності транспортних перевезень в умовах прискореного розгортання цифрової трансформації в Україні.

Виклад основного матеріалу. Забезпечення високого рівня екологічності транспортних перевезень є сфера використання ІТС з реалізацією стандартів якості виконання логістичних процесів у процесі стабільного розвитку транспортних підприємств. Вони формуються з точки зору охорони природного середовища і вимірюється супроводжуваним їх діяльністю рівнем викиду забруднюючих речовин (двоокису вуглецю CO_2) (таблиця 1), значенням показників ефективного використання відновлюваних видів енергії, її питомою вагою, що витрачається на перевезення одиниці вантажу/кількості пасажирів, гібридністю транспортних засобів та рівнем впливу на біорізноманіття пов'язаних екосистем.

Практичними шляхами зниження викидів CO_2 у процесі здійснення корпоративних транспортних перевезень можливо вважати:

- покращення логістики шляхом оптимізації маршрутів і вантажопотоків для зменшення витрат пального і викидів;

- перехід на електромобілі, а також автомобілі, створені на засадах конструктивного дизайну для ефективності CDE (Constructal Design for Efficiency) [18]. Це означає зростання рівня використання відновлювальних видів енергії значно зменшує негативні екологічні наслідки використання енергії у процесах виробництва, практичне усунення викидів шкідливих газів у вигляді оксиду азоту і твердих частинок. В цілому заощадження використовуваної енергії, зменшення попиту на викопні види вуглецевого пального, розвиток інфраструктури (зарядні станції, екологічні зони використання), стимулювання розвитку технологій виробництва акумуляторів з високою ємністю, сприяння державним та національним екологічним програмам та угодам;

- використання на ТЗ двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), що виготовляються на основі передових технологій: турбонаддуву з метою підвищення потужності ДВЗ без значного збільшення його об'єму, зменшення викидів CO_2 і підвищення паливної ефективності; прямого впорскування пального у камеру згорання; каталізаторів, систем рециркуляції вихлопних газів, фільтрів твердих часток; гібридних технологій поєднання ДВЗ з електричними двигунами; застосування легких сплавів і композитів у конструкції; сучасних електронних систем управління та контролю ДВЗ; мультиклапанних технологій покращення потоку повітря та згорання за рахунок цього пального у циліндрах ДВЗ;

впровадження альтернативних видів палива (біо-, водневих паливних елементів, синтетичних видів); систем “старт-стоп” вимикання ДВЗ під час зупинок; технології охолодження і підтримання оптимального рівня температури роботи ДВЗ;

–переведення власного транспорту на альтернативні види пального;

–використання для виконання частини бізнес-процесів громадського транспорту;

–використання технологій відновлення та заощадження енергії під час гальмування, наприклад, у автомобілях та гібридних системах (систем рекуперації звільненої кінетичної енергії у електричну; фрикційного гальмування; гальмування з варіативним зусиллям; гідравлічних систем рекуперації; систем електромагнітного гальмування; адаптивних систем гальмування на основі аналізу дорожньої ситуації, спеціальних програм забезпечення максимальної ефективності для гальмівної системи) (Ecodesign-strategy wheel, LiDS-Wheel) [18];

–використання фінансових стимулів, що пов’язані з можливостями скорочення корпоративних карбонових податків за рахунок оптимізації виробничих процесів, впровадження безвідходних технологій, використання механізмів торгівлі карбоновими кредитами, участь у програмах зменшення викидів, отримання сертифікатів екологічного управління ISO 14001, впровадження корпоративної соціальної відповідальності, інвестицій в нові технології, екологічного навчання працівників, використання біопального або водню [9].

Таблиця 1 - Показники зведеного оцінювання викидів CO₂, що безпосередньо пов’язані зі здійсненням транспортних перевезень, в системі комплексу показників Протоколу про викиди парникових газів

Сфера застосування	Опис/приклад, необхідні дані та процес збирання	Носії даних
1	2	3
КАТЕГОРІЯ 1 – ПРЯМІ ВИКИДИ ВНУТРІШНІ — прямі викиди, які потрапляють в атмосферу в результаті прямої діяльності корпорації або використання ресурсів, які нею контролюються, а також від використання нерухомості (спалювання палива на місці з використання газових котлів, витік повітря з кондиціонера тощо), що можуть стосуватися корпорації в цілому, виготовлюваного нею продукту або її підрозділу		
1.1. прямі викиди від процесів горіння на стаціонарних/нерухомих об’єктах		
1.2. прямі викиди від процесів горіння на рухомих об’єктах	Використання дизельного палива вантажними автомобілями, бензину невантажними автомобілями, зрідженого нафтового газу навантажувачами (сумішей легких вуглеводнів пропену/пропану, бутену/бутану)	Кількість пального або пройдені відстані, рахунки фактури, квитанції про доставку, про пальне, картки пального/пробігу (км)
1.3. прямі викиди летких газів		
1.4. прямі викиди від здійснення технологічних процесів виробництва		
КАТЕГОРІЯ 2 – НЕПРЯМІ ВИКИДИ — викиди в атмосферу від виробництва енергії, придбаний комунальними підприємствами. Непрямі викиди електроенергії, що придбана та спожита організацією, а також від споживання закупленої електроенергії, пари, опалення та охолодження, включаючи мобільне споживання, які виникають під час виробництва енергії		
2.1. непрямі викиди від придбаної електроенергії		
2.2. непрямі викиди централізованого опалення/охолодження		
2.3. непрямі викиди придбаної пари		
КАТЕГОРІЯ 3 – НЕПРЯМІ ВИКИДИ ЗОВНІШНІ — включає енергію, спожиту у ланцюгу постачань до і після внутрішнього виробництва, включаючи вхідне та вихідне транспортування, засоби виробництва, придбані товари та споживання, що обов’язково супроводжує утилізацію виробленого продукту [11;12]. Крім того, включає викиди, які не включено до інших сфер – викиди, що відбувається у ланцюгу створення вартості корпорації до і після внутрішнього виробництва		

ЛАНЦЮГ ПОСТАЧАЇ ДО ВНУТРІШНЬОГО ВИРОБНИЦТВА – ділові поїздки, поїздки співробітників, утворення та утилізації відходів, логістика на початку виробництва та капітальні товари [15]		
3.1. закупівля товарів та послуг	Всі викиди, що відбуваються протягом ланцюга процесів від видобутку сировини до подальшої обробки і виробництва, а також транспортування до місця виробництва кінцевої продукції: сировина, допоміжні матеріали, товари для офісу	Кількість придбаних товарів і послуг, рахунки фактури на придбану сировину та добавки для виробництва/обробки продуктів, а також пакувальний матеріал
3.2. засоби виробництва / капітальні вкладення	Викиди вуглецю – <i>Product Carbon Footprint (PCF)</i> , що виникають у процесі виробництва засобів виробництва наприклад, машин, вантажних автомобілів тощо	Дані про <i>PCF</i> при виробництві капітальних товарів
3.3. використання палива та енергії	Те ж само, що 1.2 у процесах, що передують внутрішньому виробництву корпорації	
3.4. транспорт та розподіл у довиробничому ланцюгу	Викиди, яке здійснюється зовнішньою логістичною компанією, від вантажовідправників до корпорації, яка звітує про викиди. Перевезення здійснюється зовнішніми сторонами, але оплачується компанією, що звітує про викиди	Дані про придбаний товар (вага) та подолану відстань (кілометри) для придбаної сировини та напівфабрикатів
3.5. утворення відходів в корпорації		
3.6. ділові поїздки	Службові поїздки працівників на транспортних засобах, що не належить підприємству: таксі, рейси авіакомпаній, проїзд громадським транспортом	Рахунки про витрати на відрядження працівників, поїздки, що замовляються відділом кадрів
3.7. ділові поїздки працівників	Викиди вуглецю транспортом, який не належить корпорації і яким працівники добираються до місця своєї роботи	Дані анонімного оцінювання відділом кадрів: подолані кілометри, види транспорту, к-ть робочих днів у році
3.8. об'єкти оренди у ланцюгу створення вартості	Експлуатація орендованих будівель, машин або транспортних засобів. Енергоспоживання (пряме та непряме) предметів лізингу	Споживання енергії, договори лізингу, постачальники лізингу, рахунки
ЛАНЦЮГ ПОСТАЧАЇ ПІСЛЯ ВНУТРІШНЬОГО ВИРОБНИЦТВА – інвестиції, франшизи, орендовані потужності, подальша логістика, використання проданої продукції, переробка, підготовка до повторного використання, відходи та утилізації. Оцінюється у кожному випадку за допомогою вибору критерії на основі ретельного аналізу конкретної ситуації		
3.9. транспортування та розподіл	Викиди під час транспортування товарів, яке здійснюється зовнішньою логістичною компанією, від виробників до кінцевих споживачів. Перевезення здійснюється зовнішніми логістичними компаніями, і не оплачуються компанією, що звітує про викиди	Припущення щодо тоннажу та відстані для транспортних засобів, що використовуються для доставки товарів після завершення стадії виробництва
3.10. переробка реалізованих проміжних продуктів	Викиди, що викликані переробкою проміжних продуктів, які продаються компанією, що звітує. Викиди іншої компанії при переробці продукції	Запити у замовника переробки, дані від проведення бенчмаркінгу
3.11. використання реалізованої продукції	Викиди, що виникають на стадії використання продукції, що продана кінцевим споживачам: наприклад, викиди від використання проданих вантажних автомобілів	Обсяг реалізованої продукції у звітному році, енергетичні потреби продукту (на рік або на час використання), припущення щодо поведінки користувача (частота використання протягом року), термін служби виробу в роках
3.12. утилізація реалізованої продукції	Викиди, що пов'язані з транспортними витратами на здійснення утилізації реалізованої продукції, наприклад, від транспортування її на звалища, місця спалювання, переробки та повторного використання	Обґрунтовані припущення щодо поведінки кінцевого користувача відносно утилізації на основі кількості проданих продукції та її упакування, транспортних витрат (у пропорції відсоткового розподілу за типом виробництва)
3.13. об'єкти оренди у пост виробничому ланцюгу	Викиди, спричинені об'єктами, які належить компанії-орендодавцю, що звітує, але використовуються іншими компаніями. Викиди пов'язані з орендою транспортних засобів	Звіти орендаря, рахунки

	засобів, інвестиціями, будівництвом	
3.14. франшизи	Викиди від операції з франшизою або ділової активності, в яких звітуючі корпорації виступають франчайзерами	Енергоспоживання суб'єктів діяльності, що відповідають за використання наданих франшиз
3.15. інвестиції	Викиди від інвестиційної діяльності, викиди від споживання енергії, що пов'язані з інвестиціями: участі в інших компаніях, корпоративні позики від компанії, що звітує	Запити діловим партнерам щодо споживання енергії, що пов'язане з наданими їм корпоративними інвестиціями

Джерело: розроблено авторами на основі [9; 11; 12; 15]

Серед першочергових засобів підвищення рівня екологічності корпоративної діяльності, аналіз та заходи якої відрізняється від аналізу та заходів підвищення рівня екологічності бізнес-процесів ланцюга формування вартості продукту, розглядається оптимізація корпоративної логістики засобами оптимізації маршрутів з пов'язаним зменшенням витрат пального та викидів шкідливих речовин із залученням інструментарію штучного інтелекту. Визначено основний інструментарій та методи оптимізації маршрутів, а також інструмент контролю витрат при використанні альтернативних видів пального, що дозволяють досягти підвищення рівня екологічності транспортних перевезень на основі інтелектуалізації транспортних систем.

1. Інструменти для оптимізації маршрутів:

1.1. **GPS-системи та телематика.** Сучасні GPS-системи (Global Positioning System, оригінальна назва Navstar GPS) дозволяють відслідковувати маршрути в реальному часі, що дає змогу водіям і логістам вибирати найкоротші або найменш завантажені дороги, скорочуючи час у дорозі і витрати пального. Представлені інструментами Google Maps, Waze – для коротких та середніх маршрутів з урахуванням реального трафіку, Garmin, TomTom – для детального планування та навігації в автомобілях. GPS-трекер – основний елемент для управління автопарками і моніторингу об'єктів – передає місцезположення людей, транспорту, вантажів і обладнання на телематичну платформу. При підключенні до телеметричної платформи, GPS-координати перетворюються у багатий на інформацію функціонал: контроль геолокації; поїздки – адреса, час, тривалість; функції “машини часу”; оптимізація маршрутів; сповіщення про відхилення від маршруту; геозони і місця; навігація; автоматичні звіти по поїздкам; робочі/особисті поїздки.

При цьому телематика є галуззю технологій міжмашинної взаємодії (M2M), яка об'єднує транспортну інфраструктуру, інформаційні та комунікаційні технології для забезпечення ефективної роботи транспорту і, одночасно, набір пристроїв для збору даних про манеру управління конкретним автомобілем через супутникові системи. Засобами телематики здійснюється віддалене управління, відслідковування і моніторинг автопарків, вантажних автомобілів, ходового ланцюга, спеціального обладнання, будівельного обладнання, пасажирського транспорту, особистих транспортних засобів, каршерингу, сільськогосподарських машин, стаціонарних об'єктів, вантажів і контейнерів, причепів тощо. Основу апаратного блоку з особливим програмним забезпеченням, що збирає інформацію про автомобіль в реальному часі, складає “чорний ящик” з різними датчиками і програмним забезпеченням, за допомогою якого дані передаються на сервер. Телематика Plug-and-play – технологія, яка дозволяє відслідковувати транспортні засоби і збирати дані за допомогою пристроїв, які легко підключається до порту OBD-II транспортного засобу. Телематична платформа отримує дані з автомобільних трекерів і мобільних пристроїв і відображає їх на екрані ПК або смартфона. Телематична платформа забезпечує повний огляд автопарку. Отримуючи геолокацію і показники лічильників, вона надає наступні повідомлення і функції: безпека транспортного засобу (детектор евакуації, блокування

двигуна, попередження дорожньо-транспортних пригод, зміна водія, несанкціонований рух), ефективність та витрати (контроль рівня палива, мотогодини, якість водіння, технічне обслуговування, MIL (Malfunction Indicator Lamp) – індикатор несправності, контрольний індикатор двигуна – засіб попередження водіїв про наявність проблеми/DTC (Diagnostic Trouble Code) – код, який використовується для діагностики несправностей у транспортному засобі або важкій техніці, тиск у шинах, навантаження на вісь, контроль механізмів, оптимізація маршрутів), безпека за кермом (контроль рівня стомленості водія, алкозамок, рішення ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) – набір електронних систем і технологій, які інтегровано до сучасних транспортних засобів з метою підвищення безпеки водія та покращення досвіду водіння - датчики, камери, радары, Lidar, інші технології для надання інформації та допомоги водієві у режимі реального часу, що дозволяє здійснювати адаптивний круїз-контроль, виїзд зі смуги руху та попередження-допомогу в збереженні смуги руху, попередження про виїзд зі смуги руху, попередження про зіткнення попереду, виявлення сліпих зон, допомога при паркуванні, розпізнавання дорожніх знаків, нічне бачення, виявлення пішоходів, виявлення перехресного руху та адаптивні фари, кнопка SOS), відповідні вимоги (тахограф, журнал водія, передрейсовий контроль, ретрансляція даних).

Блок управління телематикою (TCU) – вбудована бортова система, яка управляє бездротовим відслідковуванням, діагностикою і зв'язком з транспортним засобом. Системи можуть використовуватись для повідомлення про аварії eCall, електронного знімання коштів, відслідковування транспортних засобів, багатьох інших областях. Переваги використання TCU: розширення можливості підключення до транспортного засобу за рахунок додавання додаткових модемів і обробки даних для підтримання зв'язку між автомобілем і "хмарою", інфраструктурою або іншими транспортними засобами; оптимізацію потужності антени з покращенням вимірювання струму, діагностикою і низьким рівнем шуму; надійне, ефективне і швидке передавання даних, що забезпечує зв'язок з іншими системами автомобіля.

1.2. Системи управління транспортом з функцією оптимізації маршрутів та вантажопотоків. Система управління транспортом SIRUM – універсальне веб-програмне забезпечення, що поєднує функції TMS (Transportation Management System – управління транспортними перевезеннями), WMS (Warehouse Management System – управління складськими процесами) та DMS (Document Management System) в єдиній системі відображення сукупності бізнес-процесів, таких як управління замовленнями, планування і виставлення рахунків – дозволяють оптимізувати маршрути вантажівок, знижувати витрати і планувати доставки, адже автоматизують процес планування і використовують спеціальні алгоритми для знаходження оптимальних маршрутів. Систему SIRUM може бути розширено модульним способом, наприклад, за допомогою управління складом або управління автопарком/водіями. Крім того, існує додаток для водіїв та портали для клієнтів/підприємців з метою автоматизованого обміну даними і створення цифрової мережі пов'язаних учасників. Різноманітні програмні рішення – SAP TMS, Oracle Transportation Management, JDA Software – на основі використання та за допомогою стандартних додатків, платформ та технологій мають змогу не лише розробляти та відображати кожен бізнес-процес і робити його ефективним та стійким до ризиків, але і максимально повно забезпечувати належний рівень екологічності ланцюга формування вартості. Рішення також можна використовувати для створення прогнозів, наприклад, коли транспортний засіб потрібно відремонтувати або як розвиватимуться продажі у наступній половині року. Спеціалізовані програми для оптимізації маршрутів (Route Optimization Software – Route4Me, OptimoRoute,

MyRouteOnline) враховують низку факторів: завантаженість доріг, витрати пального, викиди CO₂, доступність транспортних засобів і водіїв.

Інструментами оптимізації вантажопотоків є використовувані із залученням інструментів штучного інтелекту системи управління складом, інтернет речей та сенсори, системи обробки великих масивів даних. Системи управління складом **Warehouse Management System (WMS – Manhattan Associates WMS, SAP Extended Warehouse Management)** [14] автоматизують розміщення вантажів і ефективний підбір товарів для відправки, тим самим допомагають забезпечити правильну завантаженість транспорту, що знижує кількість рейсів і витрати на перевезення. **IoT (Інтернет речей) і сенсори**, встановлені в транспортних засобах та на складах, дозволяють відстежувати рівень завантаженості, температуру, стан вантажу і оптимізувати вантажопотоки на основі отриманих даних. **Big Data та Digital Analytics** дозволяють прогнозувати попит на товари, що допомагає оптимізувати складування і транспортування вантажів, а також зменшити витрати пального. Наприклад, аналізуючи попередні дані про продажі, можна точно визначити, скільки товарів потрібно доставити в конкретний регіон і в який час.

2. Алгоритми оптимізації маршрутів:

2.1. Алгоритм комівояжера Traveling Salesman Problem (TSP) – алгоритм оптимізації мережі маршрутів, який допомагає знайти найкоротший шлях між кількома пунктами доставки, який використовується у багатьох логістичних системах. Перевагами та надбаннями можливих застосувань ІТС для оптимізації маршрутів (вирішення завдання для значної кількості точок постачання є надзвичайно розрахунково містким, навіть неможливим для проведення обчислень із застосуванням найбільш продуктивних комп'ютерів) є можливість наближеного порівняння альтернативних маршрутів пересування транспортного засобу між зростаючою кількістю місць доставки вантажу з метою отримання найбільш економного варіанту, але з обов'язковим відвіданням усіх точок виконання замовлень.

2.2. Алгоритми маршрутизації транспортних засобів Проблема маршрутизації транспортного засобу **Vehicle Routing Problem (VRP)** розширюють TSP і допомагають мінімізувати витрати, враховуючи вантажопідйомність автомобілів, обмеження за часом, кількість пунктів доставки тощо. До найбільш популярних платформ, для покращення яких інтенсивно застосовуються можливості використання штучного інтелекту, відносяться myFIEGE, PAQATO, GSMtasks, URBANTZ, які забезпечують досягнення мети швидкого та якісного планування і оптимізації, використання алгоритмів, які автоматично враховують вимоги конкретного бізнесу, автоматизоване використання відповідних основних даних, рівне використання транспортних турів, більш ефективний зв'язок через додатки та телематику, доцільно-фактичне порівняння у режимі реального часу, моделювання за допомогою альтернативних планів, кращий рівень контролю.

2.3. Генетичні алгоритми (Genetic Algorithms) – методи евристичної оптимізації, що імітують процеси природного відбору, допомагають знаходити ефективні рішення для великих і складних проблем маршрутизації у складному пошуковому просторі. Функціональними елементами процесу оптимізації при цьому визнаються бізнес-функції транспортування, зберігання, пакування, завантаження та розвантаження, обробка, пересування та тимчасове зберігання, розподіл, управління експрес-логістичною інформацією.

3. Інструменти контролю витрат при використанні альтернативних видів пального

3.1. Системи моніторингу пального – Fuelio, AMCS Maintenance, Vimcar Fleet, Fleet+, Fleethouse, Avrios, SAM, GSMtasks, Blue Eye, Odoo, Dynamics Mobile – дозволяють в режимі реального часу відстежувати витрати пального, стиль водіння і можливі шкідливі витрати, тим самим допомагають виявити неекономічні маршрути або поведінку водіїв, що збільшує витрати пального і пов'язані з цим шкідливі викиди.

3.2. Платформи для управління парком – Geotab, Samsara – забезпечують моніторинг стану ТЗ і витрат пального, допомагаючи контролювати ефективність використання автомобіля. Зниження витрат пального досягається за рахунок підвищення продуктивності маршруту пересування та диспетчеризації, максимізації часу безвідмовної роботи за допомогою прогнозного обслуговування, зниження витрат на ремонт. Ключовими факторами скорочення шкідливих викидів є економія витрат палива парку, якість технічного обслуговування автомобілів, мінімізація часу простою та витрат на технічне обслуговування транспортних засобів, бенчмаркінг бізнес-процесів використання транспорту, регулювання параметрів засобів транспортування з метою найкращого пристосування парку для виконання робочих циклів, для яких вони найкраще підходять. Залучення інструментів ІТС з метою оптимізації ПЗ платформ для управління транспортним парком забезпечує: швидкий та спрощений перегляд звітів про використання палива; доступ до критичних показників роботи двигуна для продуктивного обслуговування парку; оперативне сповіщення про код несправності двигуна для прогнозування управління ним; звіт про поведінку водія, включаючи надмірні траєкторії руху при поворотах, надлишково різке гальмування та їзду на холостому ходу; картка показників водія для мінімізації зносу автомобіля.

3.3. Альтернативні види пального у вигляді технологій використання біопалива, водню або інших альтернативних джерел енергії допомагають суттєво скоротити викиди за рахунок економного використання нешкідливого палива.

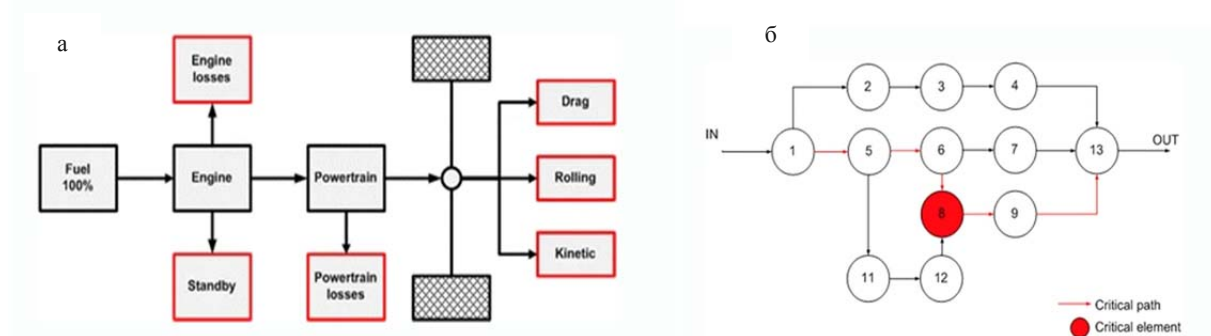
4. Засвоєння навичок еко-драйвінгу:

4.1. Програми для навчання технікам еко-драйвінгу водіїв вантажних та легкових автомобілів дозволяють суттєво скоротити витрати пального та зменшити викиди. Еко-драйвінг включає використання меншого газу на довгих прямих ділянках, раціональне використання гальм і уникання перевищення швидкості.

4.2. Автоматизовані системи рекомендацій, якими оснащено автомобілі, в режимі реального часу надають рекомендації водіям щодо оптимізації стилю водіння з метою економії пального. Інструменти коучингу водіїв використовуються для отримання зворотного зв'язку водієві в режимі реального часу та просування більш паливно-ефективної поведінки за кермом, інтеграції паливних карток, отримання динамічних звітів про тенденції викидів, проведення віддаленої діагностики, реконструкції зіткнень тощо.

Найбільш наочним свідченням доцільності та високого рівня ефективності залучення ІТС до підвищення рівня екологізації транспортних перевезень є досвід дизайну енергоощадних вантажних автомобілів як довершеної транспортної екосистеми, що у повній мірі задовольняє збалансованим вимогам економічної зрілості конструктивних виробничих рішень та можливостей кардинального оновлення на їхній основі підходів до подолання екологічних проблем і пошуку ефективних шляхів зниження шкідливих викидів. Поштовхом до вивчення шкідливих екологічних ефектів від недосконалого дизайну транспортних засобів стали фахові дослідження причин втрат пального, що пов'язувались з традиційною конструкцією вантажних автомобілів [19]. На першій стадії дослідження, яку представлено на рис. 1а – схематичному зображенні трансмісії автомобіля з двигуном внутрішнього згорання (Internal

Combustion Engine) – визначено напрями та чинники витрат транспортним засобом пального (рис. а), на другій – критичні елементи конструкції (рис. б).



Пояснення: (а): fuel – пальне; engine – двигун; engine losses – витрати пального під час роботи двигуна; standby – витрати пального на холостій роботі двигуна; powertrain – силовий агрегат; powertrain losses – витрати пального під час використання силового агрегату; drag – лобовий опір; rolling – прокачування; kinetic – кінетична енергія;

(б): critical path – критичний шлях; critical element – критичний елемент (колеса і підвіски) (16)

Рисунок 1 - Витрати пального транспортним засобом з двигуном внутрішнього згорання (а) та пов'язані з цим критичні елементи його конструкції (б)

Джерело: розроблено авторами на основі [19]

Використання інтелектуальних модульних платформ, що базується на засадах багатопрофільної оптимізації дизайну - Multidisciplinary Design Optimisation (MDO) [6] і модульної дизайн системи Modular System Design (MSD) [7; 8; 10], дозволяють вирішувати проблеми заощадження пального ще на стадіях проєктування майбутніх ТЗ (рис. 2).

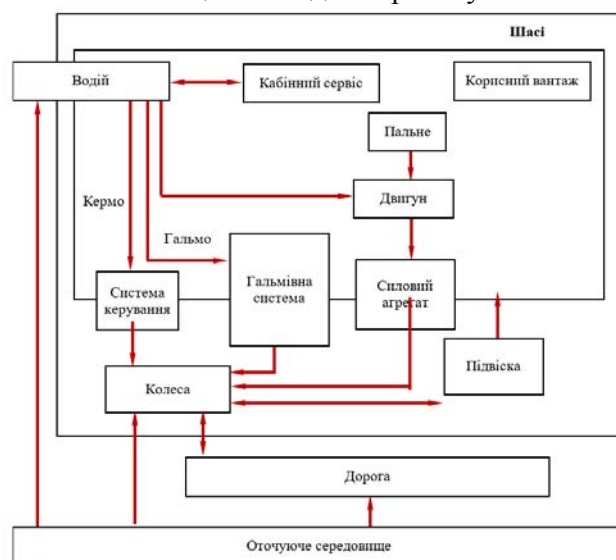


Рисунок 2 - Конструктивне проєктування модулів системи автомобіля з ідентифікованими критичними елементами та критичним шляхом

Джерело: розроблено авторами на основі [1919]

Зазначені конструкторські підходи забезпечують подолання негативних наслідків значного збільшення маси автомобіля, що контрастує з мінімальними вимогами щодо економії енергії та зменшення впливу на навколишнє середовище (рис. 3) виробництва.

Це призводить до надмірної стандартизації транспортних засобів і надлишкової конкуренції в нетехнічних аспектах (ціна, маркетинг і обслуговування). Ці елементи є

однією з головних причин технологічної зрілості, одночасно, екологічної загрози, що продукується в більшості галузей промисловості синхронізованого модульного виробництва.

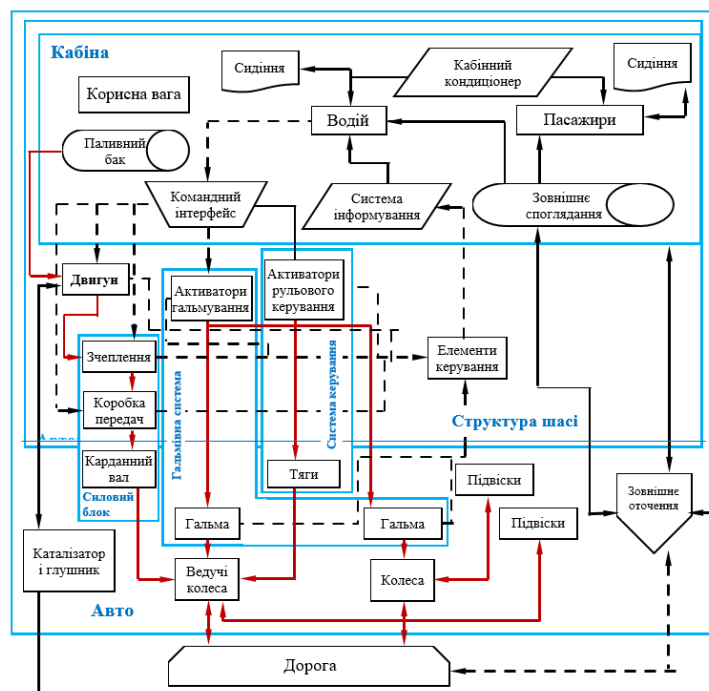


Рисунок 3 - Схематичне модульне представлення вантажного автомобіля, що реалізує комбінований CDE-підхід до еко-дизайнового проектування

Джерело: розроблено авторами на основі узагальнення і доповнення [18]

Висновки та перспективи подальших досліджень. Мета досягнення здійснення стратегічних цілей діяльності транспортних підприємств не повинна вступати у антагоністичне протистояння до мети забезпечення сучасних стандартів функціонування її екосистемного середовища. Шкідливий вплив окремих компонентів логістичних процесів на підвищення кількості шкідливих викидів з особливою ясністю проявляється під час виконання транспортних перевезень.

Передовими технологіями організації транспортно-логістичних процесів є використання пов'язаних між собою операцій щодо організування безперервного постачання сировини та виробничих напівфабрикатів Vendor managed inventory – інвентаризації запасів, що регулюється вантажовідправником; Cross docking – технології прискореної доставки товарів до точок продажу; Synchronized production – модульне виробництво на замовлення продукції.

Фізична оптимізація маршрутів і вантажопотоків у процесі корпоративної діяльності вимагає поєднання сучасних цифрових технологій, таких як телематика, алгоритми маршрутизації, аналітика великих даних і ефективне управління автопарком. Використання цих інструментів дозволяє не тільки зменшити витрати часу на виконання замовлень, але й суттєво знизити витрати на паливе, автоматично, знизити шкідливі викиди, що є важливим для забезпечення стандартів екологічності. ІТС кардинально змінюють транспортні перевезення, роблячи їх більш автономними, безпечними та екологічними. Прогрес у цій сфері буде залежати від розвитку технологій, нормативного регулювання та готовності інфраструктури до впровадження інновацій.

Перспективи використання ІТС у транспортних перевезеннях передбачають радикальні зміни, які допоможуть зробити галузь більш ефективною, безпечною та екологічно чистою. До основних напрямів розвитку ІТС в цій сфері ми віднесемо:

автономні транспортні засоби; оптимізацію маршрутів та управління трафіком на основі використання алгоритмів аналізу великих масивів даних, що дозволяють прогнозувати затори та швидко коригувати маршрути транспорту в реальному часі; залучення до ланцюга формування вартості потенціалу використання ІТС, що здатні інтегруватись до систем управління міським транспортом, контролювати світлофори, трафік та громадський транспорт; удосконалення логістики та ланцюгів постачання за рахунок автоматизації вантажних перевезень, аналітичних моделей передбачення майбутнього попиту на перевезення та відповідного управляти транспортними та складськими ресурсами; підвищення безпеки на дорогах за рахунок удосконалення інструментів аналізу поведінки водіїв, моніторингу стану транспортних засобів; системного підвищення рівня енергетичної ефективності; організування глобальних мультимодальних перевезень; інтеграції різних видів транспорту, використання технологій Hyperloop та інших інновацій.

Список літератури

1. Антошкіна Л.І., Біляєв М.М., Кореньюк Є.Д., Хрущ В.К. Стан довкілля: моделі та прогноз: монографія. Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2003. 328 с.
2. Бакуліч О.О., Гребельник М.М., Самойленко Є.С. Управління екологічною безпекою мегаполісу. Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки". Науково-технічний збірник. 2022. 161 Випуск 1 (51). С. 12-20. DOI: 10.33744/2308-6645-2022-1-51-020-027
3. Біляєв Н.М., Кореньюк О.Д., Хрущ В.К. Методи експрес розрахунку рівня забруднення атмосфери. Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2002. 192 с.
4. Линник І.Е., Лежнева О.І., Дорожко Є.В. та ін. Екологічні аспекти автотранспортного комплексу: монографія. Харків: Видавництво "Смугаста типографія", 2020. 194 с.
5. Охорона навколишнього середовища: монографія / за ред. Я.Б. Олійника. К.: Ніка-Центр, 2006. 264 с.
6. Avriel, M., Rijckaert, M.J., & Wilde, D.J. (Eds.). Optimization and design. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall. 1973. 512 p.
7. Baldwin C.Y., Clark K.B. Design rules. Vol. 1: The Power of Modularity. Cambridge: MIT Press. 2000. 483 p.
8. Baldwin, C.Y., Clark, K.B. (2002). The option value of modularity in design. *Harvard NOM Working Paper No. 02-13; Harvard Business School Working Paper No. 02-078*. Boston: Harvard business school. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=312404
9. ClimateSeed. *From carbon offsetting to climate contribution. Guidebook*. URL: <https://climateseed.com/climate-contribution-download-guide> (дата звернення 3.09.2024).
10. Ericsson A., Erixon G. Controlling design variants. Society of manufacturing engineers. 1999. 145 p.
11. European Commission, PEFCR (Product Environmental Footprint Category Rules) Guidance document. Product Environmental Footprint Category 2 Rules Guidance 3 Version 6.3 – May 2018. URL: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEFCR_guidance_v6.3-2.pdf. 2018 (дата звернення 2.09.2024).
12. European Commission. Product Umweltfußabdruck (OEF) Guide. URL: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/footprint/OEF%20Guide_final_July%202012_clean%20version.pdf. 2012. (дата звернення 2.09.2024)
13. European Commission. Product Umweltfußabdruck Category Rules Guidance. URL: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3-2.pdf. 2012 (дата звернення 2.09.2024).
14. Greb A., Schmid S., Löw I., Gulyácssy F., Lauterbach B., Baseshankar N., Pamperrien B. Logistik mit SAP S/4HANA. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Bonn: Rheinwerk. 2022. 671 s.
15. lc-impact.eu. LC-Version 1.0. A spatially differentiated life cycle impact assessment approach. URL: https://lc-impact.eu/doc/LC-IMPACT_Overall_report_20201113.pdf (дата звернення 4.09.2024)
16. materialflows.eu. URL: http://www.materialflows.eu/assets/Material_Flows_of_the_HA_Industry_LR.pdf. 33 p. (дата звернення 4.09.2024).
17. Schönsleben P. Handbuch Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. 9., Aufl. Berlin: Springer Vieweg. 2024. 876 p.
18. Trancossi, M. (2015). A response to industrial maturity and energetic issues: a possible solution based on constructal law. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2015. 7: 2. DOI: 10.1007/s12544-014-0150-4 (дата звернення 6.09.2024).
19. Wong J.Y. Theory of ground vehicles, 4th edn. 4th ed. John Wiley & Sons. 2008. New York. 592 с.

References

1. Antoshkina, L.I., Bilyaev, M.M., Korenyuk, E.D., & Khrushch V.K. (2003). *Environmental status: models and forecast*. Dnipropetrovsk: Science and Educationnm. 328 p. [In Ukrainian].
2. Bakulich, O.O., Grebelnyk, M.M., & Samoilenko, E.S. (2022). Management of the ecological safety of a megalopolis. *Bulletin of the National Transport University. Series "Technical Sciences". Scientific and Technical Collection*, 161, 1 (51), 12-20. DOI: 10.33744/2308-6645-2022-1-51-020-027 [In Ukrainian].
3. Belyaev, N.M., Korenyuk, O.D., & Khrushch, V.K. (2002). *Methods of express calculation of atmospheric pollution level*. Dnipropetrovsk: Science and Education. 192 p. [In Ukrainian].

4. Linnyk, I.E., Lezhneva, O.I., Dorozhko, E.V. at al. (2020). *Ecological aspects of the motor transport complex*. Kharkiv: Publishing house "Smugasta typografiya". 194 p. [In Ukrainian].
5. Oliynyk, Ya. B. (2006). *Environmental protection*. Kyiv: Nika-Center. 264 p. [In Ukrainian].
6. Avriel, M., Rijckaert, M.J., & Wilde, D.J. (Eds.). (1973). *Optimization and design*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
7. Baldwin C.Y., & Clark K.B. (2000). *Design rules, Vol. 1: The Power of Modularity*. Cambridge: MIT Press.
8. Baldwin, C.Y., Clark, K.B. (2002). The option value of modularity in design. *Harvard NOM Working Paper No. 02-13; Harvard Business School Working Paper No. 02-078*. Boston: Harvard business school. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=312404.
9. ClimateSeed. From carbon offsetting to climate contribution. Guidebook. (2018). <https://climateseed.com/climate-contribution-download-guide>.
10. Ericsson, A., & Erixon, G. (1999). *Controlling design variants*. Society of manufacturing engineers.
11. European Commission, PEFCR (Product Environmental Footprint Category Rules) Guidance document. (2018). Product Environmental Footprint Category 2 Rules Guidance 3 Version 6.3 – May 2018. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEFCR_guidance_v6.3-2.pdf.
12. European Commission. (2012). Product Umweltfußabdruck Category Rules Guidance. https://ec.europa.eu/environment/eusssd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3-2.pdf.
13. European Commission. Product Umweltfußabdruck (OEF) Guide. (2012). https://ec.europa.eu/environment/eusssd/smgp/pdf/footprint/OEF%20Guide_final_July%202012_clean%20version.pdf.
14. Greb, A., Schmid, S., Löw, I., Gulyácssy, F., Lauterbach, B., Baseshankar, N. et.al. (2022). *Logistik mit SAP S/4HANA*. Bonn: Rheinwerk [In German].
15. lc-impact.eu. LC-Version 1.0. A spatially differentiated life cycle impact assessment approach. https://lc-impact.eu/doc/LC-IMPACT_Overall_report_20201113.pdf.
16. materialflows.eu (2017). http://www.materialflows.eu/assets/Material_Flows_of_the_HA_Industry_LR.pdf.
17. Schönsleben, P. (2024). *Handbuch Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*. Berlin: Springer Vieweg [In German].
18. Trancossi, M. (2015). A response to industrial maturity and energetic issues: a possible solution based on constructal law. *Eur. Transp. Res. Rev.*, 7: 2. DOI: 10.1007/s12544-014-0150-4.
19. Wong, J.Y. (2008). *Theory of ground vehicles*. 4th ed. John Wiley & Sons. New York. 592 p.

Eduard Ladyzhenskyi¹, Volodymyr Petlenko², Andrii Hrynkiv², PhD tech. sci.

¹State Higher Educational Institution "Priazov National Technical University", Dnipro, Ukraine

²Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Increasing the Level of Environmental Friendliness of Transportation Based on the Intellectualization of Transport Systems

The publication is devoted to the study of ways to improve the level of environmental friendliness of transportation. The purpose of the study is to identify the possibilities of using intelligent transport systems to improve the level of environmental friendliness of transportation, as well as to conduct an analytical review of ways to increase the level of efficiency of the use of software tools, intelligent technologies that contribute to reducing the negative impact of business processes of using corporate transport in supply chains on the local environment.

The provision of a high level of environmental friendliness of transport is justified based on the use of intelligent transport systems with a plan to ensure quality standards for the implementation of logistics processes in the process of sustainable development of the corporation, which are formed from the point of view of environmental protection and measured by accompanying production activities at the level of pollutant emissions (carbon dioxide CO₂), assessment of indicators of the effective use of renewable energy, its specific weight produced per unit of cargo/number of passengers, hybridity of vehicles and the level of impact on the biodiversity of related ecosystems.

The point of view is defended that the promising capabilities of intelligent transport systems in the management of environmentally friendly transport can be realized through the use of Big Data processing algorithms with the subsequent use of systematized information for route optimization and traffic management in real time; involvement in the value chain of the intellectual potential of digital transport platforms that are able to integrate into urban transport management systems, control traffic lights, traffic and public transport; improvement of supply chain logistics through automation of freight transportation, application of analytical models for predicting future demand for transportation and appropriate management of transport and storage resources; improving road safety by improving tools for analyzing driver behavior, monitoring the condition of vehicles; systematic increase in the level of energy efficiency of fuel use; integration of different modes of transport, the use of Hyperloop technologies and other innovations

harmful emissions, environmental friendliness of transportation, intelligent transportation systems

Одержано (Received) 02.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 16.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

УДК 629.064:631.372:004.8

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.298-312](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.298-312)**О. О. Матвієнко**, доц., канд. техн. наук, **В. В. Аулін**, проф., д-р техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: AulinVV@gmail.com*

Класифікація типів сигналів та методів машинного навчання для інтелектуальної оцінки технічного стану мобільних машин підприємств агропромислового виробництва

У статті подано критичний огляд сучасних досліджень щодо застосування методів машинного навчання (МН) для визначення технічного стану вузлів і механізмів мобільних машин агропромислового виробництва (ММАПВ) за різнотиповими діагностичними сигналами (вібраційними, акустичними, температурними, тисковими тощо). Показано обмеження порогових стратегій діагностики та обґрунтовано необхідність інтелектуальної системи технічного сервісу, що поєднує сенсорну базу й адаптивні алгоритми МН для онлайн-оцінювання стану, прогнозного обслуговування і мінімізації непередбачуваних простоїв. Запропоновано концепцію комплексної класифікації сигналів і вибору алгоритмів і створює підґрунтя для масштабованих рішень, адаптованих до специфічних викликів ММАПВ.

мобільні машини, агропромислове виробництво, інтелектуальна система, технічний сервіс, машинне навчання, прогнозне технічне обслуговування, мультисенсорна діагностика, діагностичні сигнали, виявлення аномалій

Постановка проблеми. Зростаюча складність мобільних машин (ММ) в агропромисловому виробництві (АВП) призвела до значних труднощів у процесах їх обслуговування та діагностики. Ці машини працюють в різноманітних умовах навколишнього середовища та піддаються різним навантаженням, що може призвести до непередбачуваних відмов. Традиційні стратегії технічного обслуговування (ТО) часто базуються на заздалегідь визначених графіках або реактивних заходах, які є недостатніми для врахування динамічного характеру цих систем [1]. Відсутність можливостей діагностики в режимі реального часу та недостатня інтеграція між даними датчиків та алгоритмами машинного навчання (МН) ще більше погіршують неефективність сучасних систем ТО.

Одним з основних обмежень існуючих підходів є залежність від кількох порогових значень, які визначають робочі параметри та терміни для початку дій з ТО. Хоча ці порогові значення забезпечують основу для оцінки оптимального часу для ТО, вони не враховують дані датчиків у режимі реального часу, що є критично важливим для точної діагностики. Крім того, ці методи часто припускають, що дані про відмови ідентичних компонентів відповідають одному й тому ж статистичному розподілу, що не відповідає дійсності у багатьох практичних сценаріях [22]. Це спрощення призводить до неоптимального прийняття рішень та збільшує ризик непередбачуваних простоїв машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виявлено, що процес діагностики мобільних агропромислових машин страждає від відсутності стандартизації методів класифікації сигналів та вилучення ознак. Моделі з некерованим навчанням, такі як автокодувальники, метод головних компонент (РСА), k-найближчих сусідів (KNN) та нормалізуючий потік, зазвичай використовуються, але обмежуються навчанням на нормальних робочих звуках. Ці моделі не використовують позначені набори даних з кількома

категоріями несправностей, що обмежує їх здатність ефективно виявляти аномалії. З іншого боку, моделі на основі класифікації намагаються вирішити цю проблему шляхом перетворення виявлення аномалій у контрольовані або напівконтрольовані завдання за допомогою додаткових наборів даних. Однак цей підхід вимагає великих позначених даних, які часто недоступні або важко отримати в агропромислових умовах [32].

Ще одна критична проблема полягає в системах моніторингу, які зараз використовуються для діагностики несправностей у таких компонентах, як редуктори та підшипники. Хоча деякі експериментальні установки продемонстрували здатність виявляти певні проблеми в цих компонентах, вони залишаються обмеженими за обсягом та масштабованістю.

Діагностичні методи на основі звуку показали свою перспективність у виявленні відмов промислових машин шляхом поєднання виявлення аномалій з методами класифікації. Такі системи, як AudioForesight, використовують заздалегідь визначені класи помилок для моніторингу та ідентифікації відмов системи на основі акустичних сигналів. Однак ці методи обмежені своєю залежністю від заздалегідь визначених категорій помилок, які можуть не охоплювати всі можливі режими відмов, що виникають під час роботи машини [35]. Крім того, досліджувалися досягнення в методах вилучення ознак, таких як Log-Mel спектрограми, для певних типів машин, таких як повзунки та клапани, але вони потребують подальшого вдосконалення для узагальнення для різних категорій машин [30].

Алгоритми машинного навчання відіграють вирішальну роль у підвищенні точності діагностики, але стикаються з проблемами, пов'язаними з вибором ознак та інтерпретацією моделей. Різниця між різними алгоритмами часто впливає з їхніх унікальних підходів до перетворення ознак та ідентифікації несправностей. Аналіз першопричин є важливим для усунення нерелевантних ознак та спрямування фахівців на точне визначення поточних несправностей. Однак існуючим методологіям бракує єдиної системи для інтеграції різноманітних ознак та типів несправностей в єдину діагностичну систему [6].

Архітектури глибокого навчання, такі як згорткові нейронні мережі (CNN), продемонстрували виняткову продуктивність у завданнях, що включають складні візуальні шаблони. Наприклад, CNN використовувалися для оптичного вимірювання шорсткості матеріалу шляхом аналізу невеликих фрагментів зображення. Незважаючи на їх успіх у візуальних областях, їх застосування в обробці діагностичних сигналів від агропромислових машин залишається недостатньо дослідженим [11]. Аналогічно, гібридні моделі, що поєднують CNN з двонаправленими довгостроково-короткостроковими мережами пам'яті (LSTM), показали потенціал для захоплення як локальних ознак, так і довгострокових залежностей у послідовних даних, але потребують подальшого дослідження для оптимізації їх використання в цьому контексті [31].

Розробка інтелектуальних систем ТО вимагає комплексної системи класифікації, яка інтегрує дані датчиків з удосконаленими алгоритмами машинного навчання. Така система повинна бути здатною обробляти різноманітні діагностичні сигнали, адаптуючись до різних умов експлуатації. Наявність публічно опублікованих наборів даних та інструментів бенчмаркінгу надає можливість для стандартизації зусиль щодо виявлення аномалій у сферах інтелектуального виробництва [2]. Однак, все ще потрібні дослідження для розробки масштабованих рішень, які б відповідали унікальним викликам, що стоять перед мобільними агропромисловими машинами.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробити цілісну класифікацію

діагностичних сигналів, сенсорної бази й методів машинного навчання як фундамент для інтелектуальної системи технічного сервісу мобільних машин агропромислового виробництва.

Щоб досягти цієї мети, передбачено:

1. Систематизувати діагностичні сигнали (вібраційні, акустичні, ультразвукові, температурні, тискові, електричні, оптичні тощо) та пов'язані з ними фізичні величини, типи датчиків, контрольовані вузли й обмеження онлайн-застосування, базуючись на узагальненій таблиці сигналів і сенсорів.

2. Уточнити відповідні методи МН для кожної групи сигналів (CNN, LSTM, Autoencoder, Isolation Forest, GBDT тощо) та визначити критерії вибору алгоритму з урахуванням вимог до швидкодії, наявності розмічених даних і можливостей трансфер-навчання між сенсорними каналами [2].

3. Створити методологічну базу, що дозволить швидко конфігурувати інтелектуальні системи технічного сервісу для різних типів ММАПВ, мінімізуючи простої й підвищуючи надійність обладнання.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо зміст, основні характеристики та методи виявлення аномалій сукупності різних груп сигналів: вібраційних, акустичних, теплових, електричних, тиску, оптичних.

Вібраційні сигнали відіграють вирішальну роль у діагностичних процесах мобільних агропромислових машин, оскільки вони надають цінну інформацію про робочий стан та потенційні несправності механічних компонентів. Ці сигнали зазвичай генеруються динамічною взаємодією всередині деталей машин, таких як підшипники, шестерні та обертові вали. Аналіз вібраційних сигналів є важливим для виявлення аномалій, які можуть свідчити про знос, пошкодження або неспіввісність цих компонентів.

Вилучення та інтерпретація вібраційних сигналів вимагають передових методологій для забезпечення точного виявлення несправностей. Часові показники (RMS, пікова амплітуда, експес) відбивають інтенсивність коливань, тоді як аналіз у частотній області дозволяє виокремити дефектні гармоніки шестерень і підшипників. Для нестационарних режимів застосовують часово-частотні методи — вейвлет-перетворення та синхронне усереднення (TSA) — що точно локалізують короткі перехідні події [14].

Для роботи з вібраційними сигналами авторами [2] застосовано цілий ряд технік машинного навчання: моделі прогнозування часових рядів, трансферне навчання, стратегії аугментації даних, некеровані методи (зокрема автокодері), методи виявлення аномалій. У інших дослідженнях зустрічаються і інші підходи машинного навчання: SVM забезпечує високу узагальнюючу здатність, перевершуючи класичні ANN у задачах багатокласової класифікації несправностей [17]. Якість моделі істотно залежить від інформативних ознак, тому комбінують часові, частотні та часово-частотні дескриптори; попередня обробка, зокрема розкладання внутрішніх модових функцій (IMF), допомагає прибрати надлишкові компоненти і шум [15].

Робоче середовище мобільних агропромислових машин (МАПМ) створює додаткові труднощі в аналізі вібраційних сигналів. Зовнішні фактори, такі як стан ґрунту, зміни навантаження та шум навколишнього середовища, можуть впливати на якість сигналу. Датчики прискорення зазвичай використовуються для отримання одновимірних даних про вібрацію з роликів підшипників та інших критичних компонентів за цих умов [34]. Однак для зменшення шуму та підвищення надійності вилучених ознак потрібні надійні методи попередньої обробки. Інтеграція передових сенсорних технологій з інтелектуальними діагностичними системами має значні перспективи для покращення ТО агропромислової техніки. Поєднуючи високочутливі датчики зі складними алгоритмами вилучення ознак та класифікації, можна розробляти системи, здатні до моніторингу стану в режимі реального часу. Такі системи можуть

виявляти несправності на ранній стадії, скорочуючи час простою та витрати на ТО, одночасно забезпечуючи оптимальну продуктивність машини [8, 34].

Моделі машинного навчання, адаптовані для аналізу вібраційних сигналів, також повинні враховувати різноманітні робочі сценарії, з якими стикається сільськогосподарська техніка. Наприклад, класифікатори повинні розрізняти вібрації, спричинені нормальними процесами старіння, та вібрації, що виникають внаслідок механічних дефектів або пошкоджень [12]. Це розрізнення є життєво важливим для точної діагностики та ефективного планування ТО.

Підсумовуючи, вібраційні сигнали служать основою для діагностики несправностей у МАПМ. Їх аналіз включає поєднання методів вилучення ознак, специфічних для області, та алгоритмів машинного навчання, розроблених для обробки складних наборів даних у складних умовах навколишнього середовища. Розробка інтелектуальних діагностичних систем, що використовують ці підходи, має потенціал для революціонізації ТО, забезпечуючи точне виявлення несправностей та проактивні стратегії ТО [12, 14, 17, 34].

Акустичні сигнали відіграють значну роль у діагностичних процесах мобільних агропромислових машин, оскільки вони надають цінну інформацію про робочий стан та потенційні несправності різних компонентів. Ці сигнали генеруються механічними вібраціями, ударами та іншими динамічними взаємодіями всередині машини, які створюють звукові хвилі, що можуть бути захоплені та проаналізовані для діагностичних цілей. Аналіз акустичних сигналів є особливо вигідним, оскільки він дозволяє проводити неінвазивний моніторинг, зменшуючи потребу в розбиранні або безпосередньому контакті з деталями машини під час виявлення несправностей.

Використання методів МН для інтерпретації акустичних сигналів привернуло значну увагу завдяки їхній здатності обробляти складні шаблони даних та автоматично вилучати значущі ознаки. Наприклад, згорткові нейронні мережі (CNN) продемонстрували виняткову продуктивність в обробці акустичних даних, використовуючи свої ієрархічні можливості вилучення ознак. Архітектури CNN зазвичай складаються з згорткових шарів, функцій активації ReLU та операцій макс-пулінгу, які разом дозволяють ідентифікувати складні характеристики сигналу [8, 11]. Цей підхід особливо корисний для діагностики несправностей у ММ, де на акустичні сигнали може впливати шум навколишнього середовища та змінні робочі умови.

Крім того, досягнення в багатосенсорних моделях CNN підвищили точність діагностики завдяки інтеграції даних з кількох каналів. Ці моделі не тільки вивчають ознаки несправностей, але й оптимізують вибір датчиків, щоб виключити надлишкову інформацію, яка може перешкоджати ефективності навчання. Автоматизуючи вилучення ознак з необроблених акустичних сигналів без необхідності ручних кроків попередньої обробки, такі моделі перевершують традиційні методи, що спираються на вручну розроблені ознаки, чутливі до змін робочих умов [28]. Ця здатність є вирішальною для забезпечення надійної діагностики в різних сценаріях, що зустрічаються в агропромисловому виробництві.

Інший перспективний метод включає методи аналізу часової частоти, такі як синхронне усереднення за часом (TSA), які демодулюють вібраційні сигнали для моніторингу несправностей шестерень. Ці підходи полегшують вилучення діагностичних ознак з акустичних даних, одночасно пом'якшуючи вплив перехідного шуму та випадкових коливань [14]. Крім того, методи спектрального усереднення можуть бути використані для підвищення частотної роздільної здатності та придушення випадкових компонентів шуму, тим самим забезпечуючи чіткіше представлення основних характеристик сигналу [24]. Такі методи відіграють важливу роль у підвищенні точності алгоритмів класифікації несправностей, що застосовуються до акустичних даних.

Інтеграція нейронних мереж, навчених на змодельованих сигналах

несправностей, ще більше підкреслює важливість аналізу акустичних сигналів. Змодельовані дані дозволяють генерувати чітко визначені характеристики сигналу, необхідні для навчання діагностичних моделей, без необхідності великої кількості реальних випадків несправностей. Цей підхід гарантує, що нейронні мережі здатні ідентифікувати широкий спектр типів та місць несправностей у машинах [17]. Більше того, Баєсові автоматичні релевантні нейронні мережі (MLP-ARD) були використані для автоматичних систем виявлення відмов на основі акустичних сигналів, що усуває потребу в глибоких знаннях поведінки системи, зберігаючи при цьому високу надійність діагностики [16]. Незважаючи на ці досягнення, залишаються проблеми з досягненням постійної точності діагностики для різних класів несправностей. Наприклад, деякі категорії несправностей, такі як "аномалія насоса" або "аномалія клапана", демонструють нижчі показники точності та повноти через обмежену кількість випадків, доступних для навчання моделей машинного навчання [27]. Вирішення цих обмежень вимагає подальшого вдосконалення стратегій збору даних та методів оптимізації моделей, спеціально адаптованих для аналізу акустичних сигналів.

Підсумовуючи, акустичні сигнали є критичним типом діагностичного входу для мобільних агропромислових машин. Їх ефективне використання за допомогою передових алгоритмів машинного навчання та методів вилучення ознак має значні перспективи для розробки інтелектуальних систем ТО, здатних підвищити надійність та експлуатаційну ефективність машин [8, 11, 28].

Теплові сигнали відіграють значну роль у діагностичних процесах мобільних агропромислових машин, оскільки вони надають важливу інформацію про теплову поведінку та схеми розсіювання тепла різних компонентів. Ці сигнали є важливими для виявлення аномалій, таких як перегрів, що може свідчити про механічні несправності або неефективність системи. Аналіз теплових сигналів особливо актуальний для компонентів, що піддаються високому тертю або безперервній роботі, де генерування тепла є неминучим. Попередня обробка теплових даних часто включає методи фільтрації та нормалізації, щоб мінімізувати шум та нерелевантні коливання. Наприклад, автори в [14] наголошують на важливості організації вимірюваних даних та застосування відповідних частот дискретизації під час підготовки сигналу. Це гарантує, що вилучені ознаки точно відображають основні теплові явища без спотворень, спричинених зовнішніми факторами. Такі кроки попередньої обробки мають вирішальне значення для ефективного навчання моделей МН.

Інтеграція методів багатосенсорного синтезу даних показала свою перспективність у покращенні діагностичних можливостей систем, що обробляють теплові сигнали. Тао та ін. [28] порівнюють традиційні моделі CNN з методами вибору датчиків на основі MS-CNN, демонструючи, що високорівневі ознаки, вилучені з даних кількох датчиків, призводять до кращої точності діагностики та скорочення часу обчислень. Цей підхід є особливо корисним при роботі зі складними системами, де теплові сигнали взаємодіють з іншими типами діагностичних даних.

Нарешті, досягнення в сенсорних технологіях сприяли більш точному збору теплових даних з різних компонентів машин. Тао та ін. [28] описують програмовані логічні контролери (ПЛК), що використовуються для збору сигналів з багатьох датчиків протягом тривалого часу з певними частотами дискретизації, що призводить до створення великих наборів даних, придатних для навчання передових алгоритмів класифікації. Такі розробки прокладають шлях для інтелектуальних систем ТО, здатних використовувати детальну теплову діагностику поряд з іншими типами сигналів. Таким чином, аналіз теплових сигналів є критичним компонентом у діагностиці несправностей мобільних агропромислових машин, пропонуючи цінну інформацію про стан компонентів та ефективність роботи завдяки передовим методам машинного навчання та стратегіям інтеграції датчиків [6, 8, 28, 34].

Електричні сигнали відіграють вирішальну роль у діагностичних процесах

мобільних агропромислових машин, слугуючи фундаментальним типом діагностичного сигналу. Ці сигнали генеруються та передаються через різні компоненти машин, часто відображаючи робочий стан та потенційні аномалії в системі. Генерування електричних сигналів може бути пов'язане з різними механізмами, включаючи електромагнітні, магнітострикційні та п'єзоелектричні ефекти, а також лазерну інтерферометрію. Кожен механізм забезпечує унікальні переваги залежно від застосування та конкретних діагностичних вимог. Процес починається з датчиків, які фіксують ці електричні сигнали. В цьому контексті широко використовуються датчики акустичної емісії (АЕ). Ці датчики виявляють акустичні хвилі, що генеруються механічною діяльністю або несправностями в машині, та перетворюють їх на електричні сигнали. Зафіксований сигнал потім пропускається через попередній підсилювач для збільшення його сили, перш ніж фільтрується за допомогою смугового фільтра для виділення діапазону частот, що цікавить. Це гарантує, що для подальшого аналізу зберігаються лише відповідні спектральні компоненти. Згодом відфільтрований сигнал підсилюється та обробляється для отримання значущої діагностичної інформації [8].

Загалом, електричні сигнали представляють собою універсальний та незамінний інструмент для діагностики мобільних агропромислових машин. Їхня здатність фіксувати складні деталі про стани та несправності машин робить їх невід'ємною частиною розробки інтелектуальних систем, спрямованих на підвищення ефективності та надійності ТО в різних сільськогосподарських застосуваннях [8, 33].

Сигнали тиску відіграють важливу роль у діагностиці несправностей мобільних агропромислових машин, оскільки вони надають цінну інформацію про робочий стан гідравлічних систем та інших компонентів, залежних від тиску. Ці сигнали часто використовуються для моніторингу змін рівня тиску рідини, що може свідчити про такі проблеми, як витіки, блокування або знос компонентів системи. Класифікація та аналіз сигналів тиску є важливими для розробки інтелектуальних діагностичних систем, здатних виявляти аномалії та прогнозувати відмови. Записані дані, пов'язані з сигналами тиску, часто відображають різні рівні забруднення або забруднення частинками в гідравлічних системах.

Мультисенсорні дані [36] використані при описі систем діагностики несправностей гідравлічних компонентів отримані з гідравлічного випробувального стенда. Для обробки цих отриманих даних використовується комбінована модель глибокого навчання ITSO-CNN-BiLSTM (Improved Til Swarm Optimization - Convolutional Neural Network - Bidirectional Long Short-Term Memory). Це є підходом fusion (злиття інформації) з різних сенсорів. Модель ITSO-CNN-BiLSTM застосовується для діагностики стану чотирьох гідравлічних компонентів: поршневого насоса, охолоджувача, дроселя та акумулятора. Навіть при додаванні білого шуму, модель досягає високої точності класифікації ступеня деградації характеристик дроселя (наприклад, 96.73% при SNR 10 dB) та акумулятора (наприклад, 96.13% при SNR 10 dB).

Зазначене дає можливість стверджувати, що сигнали тиску (разом з іншими) є важливим входним компонентом для мультисенсорних моделей машинного навчання, спрямованих на діагностику несправностей у гідравлічних системах.

Оптичні сигнали відіграють значну роль у діагностичних процесах МАПМ, особливо коли потрібні зображення з високою роздільною здатністю та точні вимірювання. Ці сигнали зазвичай фіксуються за допомогою передових оптичних систем, таких як мікроскопи, оснащені CMOS або CCD камерами, які надають детальні візуальні дані для аналізу.

Оптичні мікроскопи OLYMPUS UPRIGHT BX51FM та DSX500i, використовуються для отримання зображень зі збільшенням до 20 мкм, пропонуючи розміри пікселів, що дозволяють точно виловити ознаки зі спостережуваних поверхонь [20]. Прикладом оптичного сигналу є зображення відсканованих монохроматичних зображень відбитків індентора. Пропонується новий метод прогнозування твердості,

який не вимагає вимірювання довжини діагоналей: навчають моделі машинного навчання прогнозувати значення твердості безпосередньо із зображення відбитка, а також інших параметрів, пов'язаних із зображенням (масштаб) та умовами тесту.

Контроль дефектів на поверхнях деталей здійснюється вимірюванням шорсткості матеріалу (значення R_a) та визначенням характеристик топографії поверхні методом аналізу візуальних даних [11]. Модель машинного навчання, а саме згортоква нейронна мережа (CNN), отримує на вхід невелике квадратне зображення поверхні матеріалу і автоматично виявляє дефекти.

Виявлено, що оптичні сигнали є важливим компонентом у діагностичному ландшафті для МАПМ. Вони мають здатність надавати детальну візуальну інформацію, підтримуючи передові методи вилучення ознак та сприяє розробці інтелектуальних систем ТО. Використовуючи технології зображення з високою роздільною здатністю разом із надійною попередньою обробкою та методами машинного навчання, дослідники можуть вирішувати проблеми, пов'язані зі змінністю навколишнього середовища та трудомісткими процесами маркування, одночасно розширюючи можливості виявлення несправностей у різних операційних контекстах [14, 20, 33].

Обґрунтуємо можливості сенсорної бази для мобільних машин агропромислового виробництва. Механічні сенсори – це акселерометри, тензорезистори, лазерні відстанеміри, датчики тиску. Вони забезпечують ключові вимірювання переміщень, сил і вібрацій мобільних машин, слугуючи базою для раннього виявлення аномалій. Лазерні відстанеміри дають високоточні дані про відносні зсуви компонентів, з яких розраховують підйомні та поперечні сили підвіски, підвищуючи стабільність ходової частини [19].

Для багатоканальних потоків даних застосовують методології вибору сенсорів: багатосенсорні CNN з подальшим відбором каналів (Random Forest) фіксують як лінійні, так і нелінійні прояви дефектів у гідравлічних та обертових вузлах [28]. Частотний аналіз дозволяє відстежувати зміщення резонансних піків у міру деградації механізмів, але вимагає фільтрації завад і виділення інформативних смуг [24].

Комбінація DWT/WPT із статистичними ознаками та вейвлет-енергією покращує класифікацію пошкоджень редуктора; оптимізація ядер SVM (лінійне, полі, RBF) дозволяє адаптуватися до різних сценаріїв експлуатації [29]. Проте MEMS-акселерометри мають нижчу частоту дискретизації, що обмежує їх пряму інтеграцію з моделями, розрахованими на високороздільні сигнали; це стимулює розвиток комбінованих схем збору даних і передобробки [2].

Надійне поєднання механічних сенсорів із методами обробки сигналів та подальшою ML-діагностикою формує основу інтелектуальних сервісних систем, покликаних мінімізувати простоту й підвищити ефективність мобільних машин у реальних аграрних умовах [5, 13, 14, 36].

Електромагнітні сенсори (PWAS-пластини, волоконно-оптичні, індуктивні та ємнісні перетворювачі) формують міцну основу безконтактної діагностики мобільних машин АПВ.

PWAS забезпечують недорогу інтеграцію у шаруваті та композитні елементи, лінійно змінюючи резонансну частоту із температурою, що спрощує калібрування для змінних теплових умов [8].

Волоконно-оптичні лінії нечутливі до електромагнітних завад, тому зберігають якість сигналу в електрично «шумних» польових середовищах [8].

Лазерні (оптичні) та індуктивні відстанеміри відстежують мікрозсуви компонентів, даючи вихідні дані для розрахунку натягів і сил підвіски, що критично для курсової стійкості техніки [19].

У прикладних стендах акселерометри комбінують із електромагнітними методами зчитування, підвищуючи контраст сигналу для виявлення редукторних дефектів [16]. Надійність ML-класифікації зростає завдяки високій якості ознак,

отриманих після зниження шуму та збалансування вибірок (наприклад, методом штучної генерації рідкісних відмов) [12, 21].

Таким чином, електромагнітні сенсори забезпечують стійкі, завадозахищені та термостабільні канали спостереження, що легко інтегруються з алгоритмами прогнозного обслуговування й істотно зменшують непередбачувані простої МАПМ [8, 16, 21].

Оптичні датчики (волоконно-оптичні лінії, інтерферометри, PWAS-пластини) забезпечують безконтактну, завадозахищену та термостійку діагностику мобільних машин АПВ. Оптичні датчики принципово є теж ЕМ-сенсори, проте в огляді виділені окремо через специфіку застосувань.

Волоконно-оптичні датчики стійкі до ЕМ-завад і надійно працюють у пилу, волозі та при температурних коливаннях, залишаючись недорогими у розгортанні [8]. PWAS, інтегровані у композитні елементи, мають лінійний зсув резонансної частоти з температурою, що спрощує калібрування та забезпечує точні вимірювання в мінливому тепловому режимі [8].

Зібрані оптичні сигнали багатовимірні та автокорельовані, тому для їх аналізу застосовують методи зниження розмірності та оцінки щільності: PCA дає швидкий огляд, а непараметричний KDE точніше виявляє аномальні кластери [18]. Високороздільні оптичні дані добре підходять для трансферного навчання: DNN-TL-моделі показують вищу точність прогнозування відмов порівняно з даними нижчої якості [2].

Інтеграція цих сенсорів із алгоритмами вилучення ознак у реальному часі формує основу прогнозного обслуговування, зменшуючи простої й витрати на сервіс та підвищуючи надійність агропромислової техніки.

Теплові датчики забезпечують точний моніторинг коливань температури у критичних вузлах мобільних машин, дозволяючи виявляти ранні ознаки перегріву, зносу та неефективності. Поєднання високошвидкісних перетворювачів із системами швидкого збору даних дає змогу фіксувати навіть мінімальні відхилення температури у реальному часі [8].

Оптимізація набору каналів здійснюється через критерій Пірсона: надлишково корельовані термопари або ІЧ-датчики відсіюють, лишаючи найбільш інформативні джерела, що знижує обчислювальне навантаження та підвищує точність діагностики [28]. У гідравлічних системах температуру поєднують із сигналами тиску; модифіковані трансформер-моделі успішно виявляють несправності на цій мультисенсорній основі.

Для аналізу теплових режимів застосовують як класичні SVM + PCA, так і глибокі мережі, останні краще узагальнюють багатовимірні залежності у складних робочих циклах [25]. Важливим залишається попередній замір фонових теплового шуму та регулярне калібрування, аби відокремити справжні аномалії від впливу оточення [12].

Металографічні дослідження довговічності роликів показали підповерхневе розтріскування, спричинене тривалим перегрівом; теплові сенсори здатні зафіксувати такі відхилення задовго до критичної відмови [13]. Додавши адаптивні методи обробки (наприклад, attention-механізми), дослідники підвищили точність класифікації температурних аномалій у різних галузях, що підтверджує потенціал інтеграції теплових датчиків у розширені системи прогнозного сервісу [33].

Хімічні сенсори (електрохімічні, оптичні, каталітичні) дають онлайн оцінку стану палива, мастил і довілля мобільних машин АПВ. Електрохімічні елементи точно визначають концентрації газів та іонів, що сигналізують про забруднення палива чи деградацію оливи [19].

У силових установках сенсори палива й мастила дозволяють коригувати процес згоряння й планувати сервіс, тоді як у польових операціях вони контролюють викиди та залишкові пестициди [10]. Надійність підвищують фільтр Калмана та мульти-сенсорне злиття даних, що знижує шум і компенсує слабкі сторони окремих каналів [19].

Алгоритми МН (наприклад, моделі з учителем для класифікації забруднень) автоматично розпізнають патерни деградації; оптимізований відбір сенсорів скорочує розмір вибірки й пришвидшує збіжність [9, 28]. Для реальної експлуатації критичні чинники — довговічність, час відгуку, діапазон чутливості та стійкість до агресивних середовищ; їх врахування формує основу інтелектуальних систем обслуговування, що мінімізують простой та екологічний вплив техніки [9, 33].

Аналіз існуючих категорій сенсорів дав можливість класифікувати їх із зазначенням типу, ключових параметрів, переваг і основних викликів (табл. 1).

Таблиця 1 – Класифікація сенсорів для мобільних машин агропромислового виробництва

Категорія	Типові сенсори (приклади)	Ключові параметри / призначення	Переваги	Основні виклики
Механічні	Акселерометр MEMS, тензодатчик, лазерний LVDT	Вібрація, сила, переміщення	Висока вибірка, пряме вимірювання механіки	Заводостійкість; MEMS — низька частота
Електро-магнітні	Індуктивний/ємнісний, PWAS, волоконно-оптичний FBGS	Деформація, акустика, корозія	Стійкість до бруду, -ЕМІ	Калібрування, складність оптики
Оптичні	Лазер-дистанс, спектрометр, інтерферометр	Зсуви, знос, тріщини	Безконтактно, висока роздільна здатність	Налаштування оптики в полі
Теплові	Термопара, RTD, IR-камера	Перегрів, термопрофіль вузла	Простота, зріла технологія	Тепловий шум, інерційність
Хімічні	Електрохімічний O, NOx; оптичний NIR-датчик	Якість палива, мастило, ґрунт	Висока чутливість, конкретність	Калібрування; довговічність

Джерело: розроблено авторами

Проведений огляд методів МН з урахуванням сутності і ключових прийомів, застосувань та типових викликів (табл. 2).

Розгляд алгоритмів машинного навчання дав можливість їх узагальнити для обробки діагностичних сигналів (табл. 3).

Підсумовуючи наведену класифікацію, варто зазначити, що вибір конкретного алгоритму машинного навчання залежить від типу сигналів, розміру даних і вимог до точності та швидкості обробки. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію переваг різних підходів у єдину адаптивну систему діагностики агропромислових машин.

Таблиця 2 – Огляд методів машинного навчання в контексті обробки діагностичних сигналів для мобільних машин агропромислового виробництва

Парадигма	Суть та ключові прийоми	Застосування / переваги	Типові виклики	Джерела
Навчання з учителем	Марковані дані → пряма відповідність «ознаки → стан». Класичні SVM RF, KNN, XGBoost показують високу прогностичну силу для механічних та матеріальних властивостей [20; 24].	Точне розрізнення норм/дефект; confusion-матриці демонструють $\geq 95\%$ для норм і прийнятну точність для «pre-fault» режимів [34].	Потреба у великих маркованих вибірках; висока вартість ручного лейблуння.	32; 24; 20; 34
Навчання без учителя	Кластеризація (k-means, ієрархічна), зниження розмірності (PCA/KPCA) та виявлення аномалій без лейблів.	Діагностика, коли міток мало або їх немає (акустика AE → тріщини [13]); synthetic SNR-datasets для відхилень [9].	Чутливість до масштабів/балансу даних; потреба у підсиленні (noise, pitch-shift, time-shift) [35].	31; 13; 9; 26
Навчання з підкріпленням (RL)	Агент у MDP вчиться політиці «спроба-помилка»; винагороди → оптимальне обслуговування.	Адаптивна мінімізація витрат/простой; підтримується моделями прогнозу стану (RF, XGBoost) [20].	Великі обчислення та обсяги даних; вирішується хмарою та онлайн-збором [15; 31].	20; 29; 15
Навчання з частковим наглядом	Комбінує невелику марковану + велику немарковану вибірку; керує імпульсом мережі через reconstruction-loss.	Дає «золоту середину» для виявлення аномалій звуку при дефіциті міток [32]; автокодери-[30].	Баланс між якістю лейблів і кількістю даних; потребує хмарних платформ [7].	7; 30; 23
Глибоке навчання	CNN — просторові структури; RNN/BiLSTM — часові ряди; AE — латентні репрезентації. Перевага — автоматичне вилучення ознак.	Висока точність у багатоканальних сигналів (акустика, вібрація). Transfer-learning із Hi-Res оптичних даних [2]; гібриди GA + SVM для витоків [21].	Потреба у GPU та маркованих даних; пом'якшується попереднім безнаглядним навчанням.	31; 36; 2

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Узагальнена класифікація алгоритмів МН для обробки діагностичних сигналів мобільних машин агропромислового виробництва

Група / підклас	Типові алгоритми	Сильні сторони для діагностики	Обмеження / ризики	Переважні сигнали/задачі	Приклади успішних робіт
Навчання з учителем	Decision Tree, Random Forest, Gradient Boosting	інтерпретація, робота з мішаними ознаками, «вбудований» відбір ознак	схильність до перенавчання без усикання / ансамблювання	вібрація, тиск, температура; класифікація станів	високоточне виявлення дефектів дросель-клапана та витоків гідро-акумулятора
	SVM (лінійне, RBF, One-Class)	висока точність на малих вибірках, робота з не-лінійними межами	висока обчислювальна вартість на великих наборах; чутливість до дисбалансу	спектральні ознаки вібрацій, АЕ; оцінка RUL	SVM + MI-відбір дає кращу точність RUL
	k-NN	простота, відсутність фази тренування	чутливість до шуму	«сирі» часові ряди вібрації, граф-з'єднання сегментів	kNN + SVM для поршневих насосів
	Naïve Bayes	надшвидкий, працює на високих розмірностях	припущення незалежності ознак	акустичні спектри, вібрація низької частоти	класифікація підшипників на стенді CWRU
	Лінійні / логістичні / поліномні, Ridge, Lasso	інтерпретованість, швидка адаптація	Лінійність / мультиколінеарність, потреба в препроцесі	термопрофілі, трендові сигнали деградації	Ridge + крос-валідація для прогнозу зносу вузлів
Навчання без учителя	k-Means	швидкий базовий кластеринг	залежність від K та початкових центрів	масиви спектральних ознак	кластеризація вібрацій редуктора
	Ієрархічна кластеризація	бачить вкладені не	потребує значних обсягів пам'яті	багатоканальні АЕ-сигнали	кластеризація станів підшипників
	DBSCAN	виявляє шуми / аномалії, не потребує K	чутливість до ϵ та minPts	тискові/вібраційні ряди з викидами	online ізоляція нових аномалій у потоках даних
	GMM	моделює багатомодальні розподіли, дає ймовірності	ЕМ-ітерування, чутливість до ініціалізації	нелінійні акселерометричні сигнали	KPCA + GMM для норм/дефект кластерів
	Спектральна кластеризація	добре відділяє складні форми кластерів	потрібна спектральна декомпозиція	високорозмірні об'єднані ознаки	граф-кластери спектрів вібрації
Глибоке навчання	CNN, RNN/LSTM, BiLSTM, Autoencoder, Transformer	автоматичне вилучення ознак, робота з нестационарними сигналами	вимагає багато даних і GPU, «чорна скринька»	Вібрація, акустика, зображення, термографія	CNN + Transformer для сигнал-to-image класифікації pomp
Навчання з підкріпленням	RL-агенти (Q-learning, DQN)	оптимізація стратегій сервісу «online»	значний час навчання, симуляція середовища	вибір режимів мастила, енергоефективності	концептуальні прототипи для гідроприводів
Ансамблі / гібриди	Bagging (RF), Boosting (AdaBoost, XGBoost), Stacking, Voting, змішані CNN-ансамблі	зниження варіації, «ловлять» різні дефекти, вищий AUC	більше обчислень, складна настройка	багатосенсорні набори, шумні дані	класифікація підшипників (RF), точність >90% на різних навантаженнях (XGBoost), покращення AUC (Stacking)

Джерело: розроблено авторами

Висновки.

1. Виконано комплексний аналіз та систематизацію діагностичних сигналів (ММАПВ). Класифіковано основні типи сигналів (вібраційні, акустичні, теплові, електричні, оптичні та хімічні), пов'язані з ними фізичні величини, датчики, контрольовані вузли й визначено обмеження їх онлайн-застосування.

2. Проаналізовано сучасні алгоритми машинного навчання щодо їх придатності для різних груп сигналів. Систематизовано критерії вибору алгоритмів (CNN, LSTM, Autoencoder, Isolation Forest, XGBoost та ін.) відповідно до вимог швидкодії, наявності розмічених даних і можливостей трансферного навчання між різними сенсорними каналами.

3. На основі проведеного дослідження запропоновано методологічну базу, яка дозволяє конфігурувати інтелектуальні системи технічного сервісу, зменшуючи простоту техніки та підвищуючи надійність обладнання.

Список літератури

1. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О. та ін. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем : монографія / за заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В. В. Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2020. 428 с.
2. Abdallah, M. et al. Anomaly detection and inter-sensor transfer learning on smart manufacturing datasets. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 1, Article 486. DOI: 10.3390/s23010486.
3. Alfeo, A. L. et al. Using an autoencoder in the design of an anomaly detector for smart manufacturing. *Pattern Recognition Letters*. 2020. Vol. 136. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.patrec.2020.06.008.
4. Bauer, W., Baranowski, J. Comparison of deep recurrent neural networks and Bayesian neural networks for detecting electric motor damage through sound signal analysis. *arXiv preprint*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2409.08309.
5. Bechhoefer, E., Butterworth, B. A comprehensive analysis of the performance of gear fault detection algorithms. *Annual Conference of the PHM Society*. 2019. Vol. 11, № 1, Article 823. DOI: 10.36001/phmconf.2019.v11i1.823.
6. Brito, L. C. et al. An explainable artificial intelligence approach for unsupervised fault detection and diagnosis in rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 163, Article 108105. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.108105.
7. Cheng, T., Guo, F. Machine anomalous sound detection based on audio synthesis generative adversarial network. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2816, № 1, Article 012041. DOI: 10.1088/1742-6596/2816/1/012041.
8. Ciaburro, G., Iannace, G. Machine-learning-based methods for acoustic emission testing: A review. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 20, Article 10476. DOI: 10.3390/app122010476.
9. Duman, T. B. et al. Acoustic anomaly detection using convolutional autoencoders in industrial processes. In: *Martínez Álvarez F. et al. (eds) SOCO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham : Springer, 2020. Vol. 950. DOI: 10.1007/978-3-030-20055-8_41.
10. Kim, A. R., Kim, H. S., Kim, S. Y. Transformer-based fault detection using pressure signals for hydraulic pumps. *Journal of Mechanical Engineering Research*. 2024. Vol. 12, № 1, Article 012345. DOI: 10.1234/jmer.2024.012345.
11. Giusti, A. et al. Image-based measurement of material roughness using machine learning techniques. *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 95. P. 377–382. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.292.
12. Gupta, S. et al. Hydraulic system onboard monitoring and fault diagnostic in agricultural machine. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2019. Vol. 62, Article e19180363. DOI: 10.1590/1678-4324-2019180363.
13. Hidle, E. L. et al. Early detection of subsurface fatigue cracks in rolling element bearings by the knowledge-based analysis of acoustic emission. *Sensors*. 2022. Vol. 22, Article 5187. DOI: 10.3390/s22145187.
14. Ignjatovska, A., Shishkovski, D., Pecioski, D. Classification of present faults in rotating machinery based on time and frequency domain feature extraction. *Vibroengineering Procedia*. 2023. Vol. 51. P. 22–28. DOI: 10.21595/vp.2023.23667.
15. Kafeel, A. et al. An expert system for rotating machine fault detection using vibration signal analysis. *Sensors*. 2021. Vol. 21, Article 7587. DOI: 10.3390/s21227587.
16. Kateris, D., Moshou, D., Gialamas, T., Gravalos, I., Xyradakis, P. Bearing fault diagnosis in mechanical

- gearbox, based on time and frequency-domain parameters with MLP-ARD. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*. 2014. Vol. 10, № 2. P. 101–106.
17. Kateris, D., Moshou, D., Pantazi, X. E., Gravalos, I., Sawalhi, N., Loutridis, S. A machine learning approach for the condition monitoring of rotating machinery. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014. Vol. 28, № 1. P. 61–71. DOI: 10.1007/s12206-013-1102-y.
18. Lee, W. J., Mendis, G. P., Triebe, M. J., Sutherland, J. W. Monitoring of a machining process using kernel principal component analysis and kernel density estimation. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. Vol. 31, № 5. P. 1175–1189. DOI: 10.1007/s10845-019-01504-w.
19. Li, D., Zheng, Y., Zhao, W. Fault analysis system for agricultural machinery based on big data. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 115145–115154. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2928973.
20. Mambuscay, C. L., Ortega-Portilla, C., Piamba, J. F., Forero, M. G. Predictive modeling of Vickers hardness using machine learning techniques on D2 steel with various treatments. *Materials*. 2024. Vol. 17, № 10. Article 2235. DOI: 10.3390/ma17102235.
21. Saad, A., Usman, A., Arif, S., Liwicki, M., Almqvist, A. Bearing fault detection scheme using machine learning for condition monitoring applications. *International Conference on Mechanical, Automotive and Mechatronics Engineering (ICMAME 2023)*. 2023. DOI: 10.53375/icmame.2023.137.
22. Salawu, E. Y., Airewa, I., Akerekan, O. E., Afolalu, S. A., Kayode, J. F., Ongbali, S. O., Awoyemi, O. O. Condition monitoring of farm machinery, a maintenance strategy for a sustainable livestock production: A review. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 430. Article 01227. DOI: 10.1051/e3sconf/202343001227.
23. Samanta, B. Gear fault detection using artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004. Vol. 18, № 3. P. 625–644. DOI: 10.1016/S0888-3270(03)00020-7.
24. Scanlon, P., Bergin, S. Using support vector machines and acoustic noise signal for degradation analysis of rotating machinery. *Artificial Intelligence Review*. 2008. Vol. 28. P. 1–15. DOI: 10.1007/s10462-008-9081-6.
25. Shan, J., Cai, D., Fang, F., Khan, Z., Fan, P. Unsupervised multivariate time series data anomaly detection in industrial IoT: A confidence adversarial autoencoder network. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2024. Vol. 5. P. 7752–7766. DOI: 10.1109/OJCOMS.2024.3511951.
26. Singh, M. T. Graph-based fault diagnosis for rotating machinery: Adaptive segmentation and structural feature integration. *arXiv preprint*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.20756.
27. Sreevidya, N., Nathala, S. S., Dayal, A., Manikandan, S. M., Zhou, J., Cenkeramaddi, L. R. Classification of anomalies in industrial machines utilizing machine sounds and deep learning. *Proc. of the 19th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2024. IEEE. DOI: 10.1109/ICIEA61579.2024.10665175.
28. Tao, H., Jia, P., Wang, X., Wang, L. Real-time fault diagnosis for hydraulic system based on multi-sensor convolutional neural network. *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 2. Article 353. DOI: 10.3390/s24020353.
29. Tran, H., Noori, M., Altabey, W. A., Wu, X. Fault diagnosis of rotating machinery using wavelet-based feature extraction and support vector machine classifier. *High Speed Machining*. 2017. Vol. 3, № 1. P. 23–41. DOI: 10.1515/HSM-2017-0003.
30. Truong, H. V., Hieu, N. C., Giao, P. N., Phong, N. X. Unsupervised detection of anomalous sound for machine condition monitoring using fully connected U-Net. *Journal of ICT Research and Applications*. 2021. Vol. 15, № 1. P. 41–55. DOI: 10.5614/itbj.ict.res.appl.2021.15.1.3.
31. Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X., Wu, D. Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*. 2018. Vol. 48. P. 144–156. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.003.
32. Wang, Y., Zheng, Y., Zhang, Y., Xie, Y., Xu, S., Hu, Y., He, L. Unsupervised anomalous sound detection for machine condition monitoring using classification-based methods. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 23. Article 11128. DOI: 10.3390/app112311128.
33. Xie, F., Sun, E., Wang, L., Wang, G., Xiao, Q. Rolling bearing fault diagnosis in agricultural machinery based on multi-source locally adaptive graph convolution. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, № 8. Article 1333. DOI: 10.3390/agriculture14081333.
34. Xie, F., Wang, Y., Wang, G., Sun, E., Fan, Q., Song, M. Fault diagnosis of rolling bearings in agricultural machines using SVD-EDS-GST and ResViT. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, № 8. Article 1286. DOI: 10.3390/agriculture14081286.
35. Yurdakul, M., Tasdemir, S. Acoustic signal analysis with deep neural network for detecting fault diagnosis in industrial machines. *arXiv preprint*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2312.01062.
36. Zhang, D., Zheng, K., Liu, F., Li, B. Fault diagnosis of hydraulic components based on multi-sensor information fusion using improved TSO-CNN-BiLSTM. *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 8. Article 2661. DOI: 10.3390/s24082661.

References

1. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., Holovaty, A.O., et al. (2020). *Metodolohichni osnovy proiektuvannia ta funktsionuvannia intelektual'nykh transportnykh i vyrobnychykh system: monohrafiia*. V.V. Aulin (Ed.). Kropyvnytskyi: Vydavets' Lysenko V.F. [in Ukrainian].
2. Abdallah, M., et al. (2023). Anomaly detection and inter-sensor transfer learning on smart manufacturing datasets. *Sensors*, 23(1), Article 486. <https://doi.org/10.3390/s23010486>
3. Alfeo, A.L., et al. (2020). Using an autoencoder in the design of an anomaly detector for smart manufacturing. *Pattern Recognition Letters*, 136, 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.06.008>
4. Bauer, W., & Baranowski, J. (2025). Comparison of deep recurrent neural networks and Bayesian neural networks for detecting electric motor damage through sound signal analysis. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.08309>
5. Bechhoefer, E., & Butterworth, B. (2019). A comprehensive analysis of the performance of gear fault detection algorithms. *Annual Conference of the PHM Society*, 11(1), Article 823. <https://doi.org/10.36001/phmconf.2019.v11i1.823>
6. Brito, L.C., et al. (2022). An explainable artificial intelligence approach for unsupervised fault detection and diagnosis in rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163, Article 108105. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108105>
7. Cheng, T., & Guo, F. (2024). Machine anomalous sound detection based on audio synthesis generative adversarial network. *Journal of Physics: Conference Series*, 2816(1), Article 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2816/1/012041>
8. Ciaburro, G., & Iannace, G. (2022). Machine-learning-based methods for acoustic emission testing: A review. *Applied Sciences*, 12(20), Article 10476. <https://doi.org/10.3390/app122010476>
9. Duman, T.B., et al. (2020). Acoustic anomaly detection using convolutional autoencoders in industrial processes. In Á. Martínez Álvarez et al. (Eds.), *SOCO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 950). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20055-8_41
10. Kim, A.R., Kim, H.S., & Kim, S.Y. (2024). Transformer-based fault detection using pressure signals for hydraulic pumps. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 12(1), Article 012345. <https://doi.org/10.1234/jmer.2024.012345>
11. Giusti, A., et al. (2020). Image-based measurement of material roughness using machine learning techniques. *Procedia CIRP*, 95, 377–382. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.292>
12. Gupta, S., et al. (2019). Hydraulic system onboard monitoring and fault diagnostic in agricultural machine. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62, Article e19180363. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180363>
13. Hidle, E.L., et al. (2022). Early detection of subsurface fatigue cracks in rolling element bearings by the knowledge-based analysis of acoustic emission. *Sensors*, 22, Article 5187. <https://doi.org/10.3390/s22145187>
14. Ignjatovska, A., Shishkovski, D., & Pecioski, D. (2023). Classification of present faults in rotating machinery based on time and frequency domain feature extraction. *Vibroengineering Procedia*, 51, 22–28. <https://doi.org/10.21595/vp.2023.23667>
15. Kafeel, A., et al. (2021). An expert system for rotating machine fault detection using vibration signal analysis. *Sensors*, 21, Article 7587. <https://doi.org/10.3390/s21227587>
16. Kateris, D., Moshou, D., Gialamas, T., Gravalos, I., & Xyradakis, P. (2014). Bearing fault diagnosis in mechanical gearbox, based on time and frequency-domain parameters with MLP-ARD. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 10(2), 101–106.
17. Kateris, D., Moshou, D., Pantazi, X.E., Gravalos, I., Sawalhi, N., & Loutridis, S. (2014). A machine learning approach for the condition monitoring of rotating machinery. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(1), 61–71. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-1102-y>
18. Lee, W.J., Mendis, G.P., Triebe, M.J., & Sutherland, J.W. (2020). Monitoring of a machining process using kernel principal component analysis and kernel density estimation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(5), 1175–1189. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01504-w>
19. Li, D., Zheng, Y., & Zhao, W. (2019). Fault analysis system for agricultural machinery based on big data. *IEEE Access*, 7, 115145–115154. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928973>
20. Mambuscay, C.L., Ortega-Portilla, C., Piamba, J.F., & Forero, M.G. (2024). Predictive modeling of Vickers hardness using machine learning techniques on D2 steel with various treatments. *Materials*, 17(10), Article 2235. <https://doi.org/10.3390/ma17102235>
21. Saad, A., Usman, A., Arif, S., Liwicki, M., & Almqvist, A. (2023). Bearing fault detection scheme using machine learning for condition monitoring applications. *ICMAME 2023*. <https://doi.org/10.53375/icmame.2023.137>

22. Salawu, E.Y., et al. (2023). Condition monitoring of farm machinery, a maintenance strategy for a sustainable livestock production: A review. *E3S Web of Conferences*, 430, Article 01227. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001227>
23. Samanta, B. (2004). Gear fault detection using artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18(3), 625–644. [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00020-7)
24. Scanlon, P., & Bergin, S. (2008). Using support vector machines and acoustic noise signal for degradation analysis of rotating machinery. *Artificial Intelligence Review*, 28, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10462-008-9081-6>
25. Shan, J., Cai, D., Fang, F., Khan, Z., & Fan, P. (2024). Unsupervised multivariate time series data anomaly detection in industrial IoT: A confidence adversarial autoencoder network. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5, 7752–7766. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3511951>
26. Singh, M.T. (2025). Graph-based fault diagnosis for rotating machinery: Adaptive segmentation and structural feature integration. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.20756>
27. Sreevidya, N., et al. (2024). Classification of anomalies in industrial machines utilizing machine sounds and deep learning. In *Proc. of the 19th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. <https://doi.org/10.1109/ICIEA61579.2024.10665175>
28. Tao, H., Jia, P., Wang, X., & Wang, L. (2024). Real-time fault diagnosis for hydraulic system based on multi-sensor convolutional neural network. *Sensors*, 24(2), Article 353. <https://doi.org/10.3390/s24020353>
29. Tran, H., et al. (2017). Fault diagnosis of rotating machinery using wavelet-based feature extraction and support vector machine classifier. *High Speed Machining*, 3(1), 23–41. <https://doi.org/10.1515/HSM-2017-0003>
30. Truong, H.V., et al. (2021). Unsupervised detection of anomalous sound for machine condition monitoring using fully connected U-Net. *Journal of ICT Research and Applications*, 15(1), 41–55. <https://doi.org/10.5614/itbj.ict.res.appl.2021.15.1.3>
31. Wang, J., et al. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003>
32. Wang, Y., et al. (2021). Unsupervised anomalous sound detection for machine condition monitoring using classification-based methods. *Applied Sciences*, 11(23), Article 11128. <https://doi.org/10.3390/app112311128>
33. Xie, F., et al. (2024). Rolling bearing fault diagnosis in agricultural machinery based on multi-source locally adaptive graph convolution. *Agriculture*, 14(8), Article 1333. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081333>
34. Xie, F., et al. (2024). Fault diagnosis of rolling bearings in agricultural machines using SVD-EDS-GST and ResViT. *Agriculture*, 14(8), Article 1286. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081286>
35. Yurdakul, M., & Tasdemir, S. (2023). Acoustic signal analysis with deep neural network for detecting fault diagnosis in industrial machines. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.01062>
36. Zhang, D., et al. (2024). Fault diagnosis of hydraulic components based on multi-sensor information fusion using improved TSO-CNN-BiLSTM. *Sensors*, 24(8), Article 2661. <https://doi.org/10.3390/s24082661>

Oleksandr Matviienko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Aulin**, Prof., Dr. tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Classification of Signal Types and Machining Methods for Intelligent Assessment of the Technical Mill of Mobile Machines for Agro-Industrial Production

The article provides a critical review of current research on the use of machine learning (ML) methods for identifying the technical state of units and mechanisms of agro-industrial production machines for different types of diagnostic signals (vibration, acoustic, temperature, vice, etc.). The exchange of threshold diagnostic strategies is shown and the need for an intelligent technical service system is highlighted, which integrates a sensor base and adaptive MN algorithms for online assessment of the plant, predictive maintenance and minimization of untransferable downtime. The concept of complex signal classification and selection of algorithms is proposed and creates a framework for scaling solutions adapted to specific agro-industrial production machines calls.

mobile machines, agricultural production, intelligent system, technical service, machine learning, predictive technical maintenance, multisensory diagnostics, diagnostic signals, anomaly detection

Одержано (Received) 21.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 22.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.05.2025

Т. М. Надич, В. В. Аулін, проф., д-р техн. наук.,

А. В. Гриньків, ст. дослідник, канд. техн. наук, В. В. Слонь, канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: AulinVV@gmail.com

Методи і заходи удосконалення системи технічного сервісу вантажних автомобілів на основі кіберфізичного підходу і розробки науково-технічної документації його операцій

Стаття присвячена системі інформаційного забезпечення проведення операцій технічного обслуговування, технічного діагностування і поточного ремонту вантажних автомобілів на підприємствах технічного сервісу. Розглянуто питання інтеграції науково-технічної документації щодо проведення технологічних операцій технічного сервісу вантажних автомобілів, згідно принципів кіберфізичного підходу, єдиного інформаційного простору.

З'ясовані нові можливості системи технічного сервісу вантажних автомобілів з розвитком інтелектуальних інформаційних технологій і кіберфізичного підходу, коли формується єдиний інформаційний простір. Наведено взаємозв'язок нормативно-документального і інформаційного забезпечення із задачами технічного сервісу вантажних автомобілів. Визначено, що їх частка в усьому технологічному процесі технічного сервісу складає у середньому 40%, а розроблена інформаційна база призводить до скорочення його тривалості на 20%.

Розроблено схему реалізації системи управління технічним станом вантажних автомобілів. Показана роль оператора в ефективності і надійності надання послуг з операцій технічного сервісу та зростання вимог у випадку включення системи технічного сервісу до єдиного інформаційного простору кіберфізичної системи. Визначено, що ефективність інформаційної бази даних залежить від її структури, кількості і складу автоматизованих робочих місць.

З'ясовано систему інформаційного супроводу технічного обслуговування та технічної діагностики, методологію створення інформаційної системи використанням кіберфізичного підходу єдиного інформаційного простору. Показано вплив такого простору і методів штучного інтелекту прийняття рішень на якість надання послуг технічного сервісу вантажних автомобілів. Встановлено, що інтранет та інтернет-технології з переходом до мережових комп'ютерних технологій забезпечують оперативний облік інформації, що сприяє підвищенню ефективності робіт технічного обслуговування і ремонту на підприємствах автомобільного транспорту та підприємств технічного сервісу при значному зниженні трудовитрат. Розроблено версію програми "АвтоКаталог", що представляє собою довідково-інформаційну систему і стосується вантажних автомобілів, їх конструкції та технологічних операцій технічного сервісу.

вантажний автомобіль, технічний стан, технічний сервіс, кіберфізичний підхід, інформаційний простір, науково-технічна документація, база даних

Постановка проблеми. Відомо, що показники ефективності експлуатації вантажних автомобілів, визначаються технічним станом парку машин та продуктивністю праці водіїв [1].

Кіберфізичний підхід в проблемі забезпечення належного рівня технічного стану парку машин та його ефективність обумовлюється формуванням інформаційного простору з використанням нормативно-технічної документації з технічного обслуговування і ремонту (ТОіР), бази даних за технічною діагностикою (ТД) та інформаційних технологій її формування та обробки [2].

Чинне нормативно-документальне забезпечення ТОіР вузлів, систем, агрегатів та автомобілів у цілому не адаптоване до інтеграції науково-технічної документації (НТД) в єдину інформаційну систему. Воно також слабо адаптоване до впровадження

інноваційних рішень у цій сфері [5]. У контексті експлуатації та технічного обслуговування вантажних автомобілів (ВА), що базується на концепції кіберфізичних систем (КФС), подібні питання розглядаються ізольовано одне від одного [4]. Розвиток та впровадження КФС у транспортній галузі стикається з труднощами через відсутність чітких методологічних основ, недостатню розробку принципів їх побудови та нез'ясованість особливостей функціонування. Зокрема, для ВА досі не створено інформаційного компонента, який би забезпечував формування повноцінного інформаційного простору КФС технічного сервісу [6,7,9].

Визначено, що НТД, необхідна для організації системи технічного сервісу (ТС) та технічної експлуатації машин парку транспортних засобів (ТЗ). НТД технічного діагностування ТО і Р, постійно уточнюється, розвивається та коригується відповідно до нових умов експлуатації ВА та їх конструктивних характеристик. Зазначені особливості враховуються в НТД, беручи до уваги підбір, систематизацію та оновлення компонентів і підходів. На увагу заслуговує кіберфізичний підхід та створення кіберфізичної системи ТС [8,10]. Це обумовлено тим, що на практиці фахівці витрачають багато часу при використанні та оперуванні НТД. Нерідко використовуються застарілі або неповні комплекти НТД під час організації і проведення операцій ТС, а на практиці спостерігається складність та багатогранність технологічних операцій обслуговування ВА, що обумовлює зниження якості надання ТС [11-12]. Зазначені складнощі усуваються вдосконаленням організації ТС вантажних автомобілів виділенням інформаційної підсистеми КФС ТС застосуванням комп'ютерних засобів і інформаційних технологій для оперування НТД. Насьогодні це потребує нових проєктів, прикладних комп'ютерних програм і розробки алгоритмів їх впровадження на автотранспортних підприємствах (АТП) і підприємствах ТС (ПТС). В зв'язку з цим розробка прийомів та методів організації та проведення ТС ВА в КФС є безумовно актуальним завданням сучасної інженерної науки в галузі автомобільного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автомобільний транспорт (АТ) є одним із засобів, що дає змогу підвищити продуктивність праці, в різних галузях економіки України [4,9]. При цьому його частка в зростанні продуктивності праці становить від 40 до 50%. В той час частка перевезень автомобільним транспортом загалом сягає 60...80%. Це обумовлюється мобільністю і надійністю ТЗ АТ та порівняно низькою собівартістю перевезень і прийнятним радіусом перевезень.

Що стосується технічного стану ТЗ на АТ, то вони мають недостатній рівень. Вузли, системи і агрегати, особливо ВА вітчизняного виробництва характеризуються високою спрацьованістю. Виробнича база АТ потребує істотного удосконалення [13-16]. Спостерігається експлуатація рухомого складу (РС) парку машин понад нормативний термін служби і навіть в критичному стані. Виявлено, що 29% фонду робочого часу, становлять простой ТЗ, обумовлені відмовами та рядом технічних причин, а залишковий ресурс ВА не перевищує 15...25% від вихідного. Рівень забезпеченості галузей економіки України ВА не повною мірою відповідає потребам [17-18]. Недостатня забезпеченість товаровиробників ВА та зниження її технічного рівня негативно позначаються на реалізації ТС.

Вітчизняні ВА за рівнем енергонасиченості, а також техніко-економічними параметрами (паливної економічності) суттєво поступаються закордонним аналогам. Це є однією з причин, що не дозволяє істотно підвищити їхню продуктивність і знизити втрати продукції. В той час підтримка належного технічного рівня ВА потребують збільшення витрат [8,19,20].

Заходи щодо забезпечення працездатності автопарку проводяться за рахунок вдосконалення виконання технологічних операцій з ТО і Р. При цьому необхідність експлуатації техніки, що виробила ресурс, створює велике додаткове навантаження на ремонтні служби АТП і підприємств ТС. У той же час перенесення основних обсягів робіт з відновлення працездатності машин призвело до зниження якості ТС через

відсутність відповідних виробничих потужностей та недостатньої оснащеності обладнання для проведення ТД стану ВА і кваліфікацію працівників [15,21,22].

ВА експлуатуються в різних дорожніх і кліматичних умовах. Це зумовлює дії пов'язані з впливом механічних, фізичних та інших, різних за природою, факторів і спричиняють зміну їх технічного стану [14,23,24].

Збільшення швидкості руху ВА, його інтенсивності, підвищення потужності двигунів, вантажопідйомності та місткості ВА обумовлюють посилення вимог до експлуатаційної надійності, технологічних та організаційних зв'язків ПАТ та ПТС.

Експлуатаційну надійність ВА можливо забезпечувати підвищенням рівня самої надійності ВА, їхніх вузлів, систем та агрегатів при проектуванні та виробництві шляхом виготовлення деталей з використанням інноваційних матеріалів, що мають високі експлуатаційні характеристики та властивості. Це можливо здійснити і за рахунок удосконалення методів та способів системи ТС її забезпеченням найбільш сприятливих умов експлуатації [16,17,23,24].

Велика роль у підвищенні якості експлуатації ВА, раціональному використанні їхнього ресурсу, своєчасному виявленні та запобіганні відмов належить ТО і ТД. Керування технічним станом ВА є проблемою парку машин, яка може бути вирішена вдосконаленням методів та засобів системи ТС [4-7]. Своєчасне та якісне ТО і поточний ремонт (ПР) ВА підвищує рівень експлуатаційної надійності. ТО і ПР ВА забезпечують безвідмовну роботу вузлів, систем і агрегатів у встановлених межах періодичностей, згідно пробігу ВА.

ТС нових ВА охоплює етапи початкової та основної експлуатації. До складу операцій ТОіР входять також заходи з контролю технічного стану. Оцінювання технічного стану ВА полягає у фіксації реальних значень технічних параметрів і виявленні характерних якісних ознак, з подальшим їх порівнянням із нормативними вимогами, встановленими відповідною [2,3,5,6].

Основним засобом реалізації контрольних заходів виступає ТД, яка дозволяє здійснювати оцінку та управління технічним станом автомобіля, його систем, вузлів та агрегатів без демонтажу. Після завершення процедур контролю для усього парку ВА формується перелік необхідних робіт з ТО і Р, а також визначаються методи усунення виявлених несправностей і пошкоджень [13-15,26]. Завдяки впровадженню доступних діагностичних засобів, активного поширення набули профілактичні обслуговуючі заходи, що виконуються за результатами діагностичних висновків щодо технічного стану ВА.

У країнах Європейського Союзу та США існують суттєві відмінності у формах і підходах до виконання ТО та ТД [27-28]. Наприклад, у Польщі активно використовуються мобільні сервісні майстерні під назвою «Технічна допомога», у Болгарії змінюють інтервали між обслуговуваннями, а в Угорщині технічне обслуговування здійснюється щотижня на спеціалізованих сервісних підприємствах. У Румунії передбачено регулярне виконання ЩО, ТО-1 та ТО-2. У Німеччині функціонують як кооперативні центральні станції, так і мобільні бригади. У Чехії діє розгалужена мережа станцій, які виконують повний спектр робіт з ТО і ТД.

У таких країнах, як США, Велика Британія, Італія та Німеччина [3,9], реалізовано комплексну систему ТО і ТД, що інтегрується ще на етапах проектування, розробки й серійного виробництва ВА. Система технічного обслуговування та ремонту діє протягом усього життєвого циклу транспортного засобу. Виробники несуть основну відповідальність за забезпечення технічної справності ВА, що включає постачання запасних частин, організацію обслуговування, заправки, кріплення, змащування, а також використання як стаціонарних, так і мобільних засобів ТО і ТД, з визначенням відповідного обсягу робіт. Широкого поширення набули невеликі ремонтні пункти, розташовані поблизу місць стоянки або базування ВА, що сприяє мінімізації простоїв під час експлуатації [8].

Метою цієї роботи є з'ясування основних методів і заходів удосконалення системи технічного сервісу вантажних автомобілів забезпеченням ефективної реалізації його операцій на основі кіберфізичного підходу і розробки відповідної науково-технічної документації.

Виклад основного матеріалу. Технічний сервіс є основним видом виробничого обслуговування на АТП і ПТС. Рівень роботи цих АТП і АТС значною мірою впливає на ефективність використання ВА. У вітчизняній практиці цей вид діяльності склався у формі внутрішньогосподарського обслуговування АТП ремонтно-технічними підрозділами та спеціалізованими ПТС.

З урахуванням сучасних умов, перспектив розвитку та вимог до ТО, ТД і ПР автотранспортних засобів (АТЗ), формується відповідна організаційна структура ТС. Варто зауважити, що операції з ТО та ремонту належать до трудомістких процесів, які забезпечують належний технічний стан АТЗ. Від якісного виконання цих процесів значною мірою залежать безвідмовна робота, довговічність, збереження технічних характеристик і загальна ефективність експлуатації транспортних засобів.

У зв'язку з тим, що значна частина потужностей обслуговуючої інфраструктури ПТС була комерціалізована та переорієнтована, частка участі водіїв у проведенні операцій технічного обслуговування за останні роки зросла до 85 %.

Дослідження показали, що для забезпечення належного рівня якості та ефективності експлуатації АТЗ, водії мають щоденно витрачати не менше 1,0...1,5 години на виконання ТО і додатково 0,5...1,0 години на регульовальні та налаштувальні технологічні операції. Проте прагнення збільшити продуктивний час зміни призводить до скорочення тривалості підготовчих операцій з підготовки АТЗ, що негативно впливає на ефективність їх використання. Встановлено, що простой ТЗ з технічних причин можуть сягати до 30 % від загального фонду робочого часу. У таких умовах технічна готовність автотранспорту знижується до 55...70 %, а витрати на обслуговування при неефективній системі ТС можуть перевищити витрати на виробництво техніки. Отже, забезпечення технічної справності АТЗ набуває особливого значення, що значною мірою залежить від обраних форм і методів організації технічного сервісу.

На загальнодержавному рівні АТП формують єдину підсистему ТО. Для цього створюються дилерські центри та дистриб'юторські організації, що забезпечують постачання запасних частин. Додатково вони надають послуги з навчання персоналу, забезпечують довідковими матеріалами й технічною документацією, а також постачають обладнання для виконання сервісних робіт. Варто зазначити, що гарантійне ТО дилерами здійснюється безкоштовно лише за умови використання оригінальних витратних матеріалів, вироблених підприємствами-виробниками АТ. Після завершення гарантійного строку технічне обслуговування проводиться безпосередньо автотранспортними підприємствами або відповідними підрозділами ТС.

Аналізуючи стан ТС АТЗ, слід констатувати, що протягом останніх десятиліть він не зазнав істотного розвитку відповідно до вимог державної політики та науково-технічного прогресу. Попри розширення мережі СТО, машинно-технологічних станцій (МТС) і спеціалізованих ремонтних підприємств, такий підхід вичерпав себе і в сучасних умовах втрачає актуальність. У зв'язку з цим модернізація системи ТС АТЗ має здійснюватися шляхом трансформації її внутрішньої організації та концептуального переосмислення як складової КФС.

Одним із ключових напрямів розвитку ТС є організація високоякісного обслуговування автомобілів на вторинному ринку. Реформування системи ТС має на меті підвищення рівня наданих послуг з ТО ТЗ. На якість виконання технічних робіт в АТП та ПТС суттєво впливають: ступінь забезпеченості сучасним обладнанням, професійна підготовка персоналу, якість використовуваних запасних частин (ЗЧ), ефективність організації виробничих процесів, а також нормативне й методичне

забезпечення виконання процедур ТО та ТД.

За результатами оцінок, система ТС ВА може забезпечувати до 25 % загальної ефективності технічної експлуатації автомобілів (ТЕА). Згідно з даними ДЕРЖСТАНДАРТ України, оптимізація системи ТС дозволяє скоротити тривалість операцій ТО і ТД на 8...12 %. У свою чергу, це сприяє збільшенню напрацювання автомобіля на 20...28 % і зростанню його продуктивності на 34...46 %.

На сучасному етапі технічне обслуговування ВА посідає важливе місце в його життєвому циклі (ЖЦ). Розподіл трудових витрат протягом усього ЖЦ автомобіля свідчить: лише 1,5 % припадає на процес виготовлення, 45,5 % – на ТО, 45 % – на поточний ремонт, а ще 8 % – на капітальний ремонт. Таким чином, сектор технічного обслуговування, як ключовий елемент системи ТС, вимагає належної уваги з боку організацій, що забезпечують надійну експлуатацію АТЗ.

Результати опитування водіїв за розробленими анкетами щодо проведення ТОіР ВА наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати обробки анкет, які пропонувалися водіям вантажних автомобілів щодо використання сервісних послуг

Де проводиться технічне обслуговування і поточний ремонт вантажних автомобілів?	Розподіл відповідей, %	
	2014 р.	2024 р.
Обслуговуємо техніку лише самі	63,2	5,5
В основному намагаємось обслуговувати свою техніку самі	32,8	36,1
Звертаємось за обслуговуванням у спеціалізовані Підприємства досить часто	3,6	38,9
Обслуговуванням нашої техніки займаються тільки спеціалізовані підприємства	0,4	19,5

Джерело: розроблено авторами

Слід відзначити суттєву зміну ставлення водіїв до процедур ТО ВА. За останній період спостерігається зростання кількості підприємств, які звертаються за наданням сервісних послуг до ПТС. Водночас, аналіз зворотного зв'язку свідчить про наявність певних проблем у сфері обслуговування. Так, 10 % респондентів відзначили незадовільну якість послуг, 8 % вказали на недостатній рівень професійної підготовки персоналу, 9,3 % – на надмірну тривалість очікування обслуговування, а близько 9 % звернули увагу на значну складність та трудомісткість процедур оформлення документації.

Серед основних показників, що засвідчують вплив професійної майстерності водіїв і персоналу технічного обслуговування на ефективність ТЕА, особливу роль відіграють показники експлуатаційної надійності та економічності ВА. До таких показників належать, зокрема, напрацювання до відмов чи несправностей, тривалість простоїв з причин технічного обслуговування, обсяги витрат запасних частин, рівень споживання пального, а також інтервали між черговими ТОіР. За попередніми оцінками, сумарний вплив рівня кваліфікації персоналу на технічну готовність автопарку та витрати на технічне обслуговування становить близько 33...36 %, при цьому внесок обслуговуючого персоналу оцінюється на рівні 64...67 %.

Інтеграція засобів ТД у систему ТО дає змогу суттєво підвищити її ефективність, зокрема за рахунок запобігання потенційним відмовам, скорочення кількості зайвих демонтажних операцій, а також більш повного використання залишкового ресурсу машин. Діагностування технічного стану являє собою комплекс заходів, спрямованих на встановлення фактичного технічного стану транспортного засобу з подальшим визначенням необхідних ремонтно-обслуговуючих дій. За наявності відповідного технічного оснащення та економічної доцільності, процес діагностики може бути повністю реалізований безпосередньо на базі АТП. Практика впровадження

діагностичних процедур свідчить про можливість збільшення міжремонтного ресурсу в 1,3...1,5 раза, зниження кількості відмов у 2,0...2,5 раза, а також зменшення витрат пального на 5...8 %.

Подальший розвиток системи ТОiР за технічним станом орієнтується на впровадження сучасних технологій контролю та діагностики, з урахуванням активного використання інтелектуальних вимірювальних засобів і комп'ютеризованої обробки діагностичних даних. Водночас нормативно-документальне забезпечення процедур ТО та ТД залишається недостатньо врегульованим. На сьогодні як в Україні, так і за її межами, тривають науково-дослідні роботи, спрямовані на вдосконалення методів ТО на основі автоматизованого контролю технічного стану ТЗ.

Серед перспективних напрямів досліджень особливу увагу приділено розробці методів і відповідних технологій діагностування технічного стану АТЗ на основі аналізу швидкоплинних процесів, що виникають під час роботи двигуна у перехідних і тестових режимах – вільного розгону, пробігу тощо. Визначено також пріоритетні напрями досліджень, що стосуються виявлення найбільш інформативних динамічних характеристик, здатних слугувати основою для об'єктивного оцінювання технічного стану окремих вузлів і агрегатів автомобіля.

У той же час, з урахуванням нових тенденцій щодо перерозподілу робіт з ТС з підприємств у технічні центри, не повною мірою задовольняють вимоги функціонування ВА у галузях економіки:

- не можуть поєднувати в комплексі роботи з ТО та ТД автомобілів;
- не мають достатньої інформаційної бази даних (ІБД) у плані інформаційних технологій, що знижує оперативність ТО та ТД автомобілів;
- необґрунтований набір інструментів та обладнання зумовлює необґрунтоване подорожчання ТО і ПР;
- не достатньо враховують впровадження у АТП сучасної техніки нового покоління;
- не мають універсального застосування, внаслідок чого більшу частину часу за терміном служби простоюють, особливо у зимовий період.

На сьогодні існують спроби створення таких комплексів. Але вони також мають ряд недоліків, що знижують їх ефективність: відсутність наукової обґрунтованості базового комплексу та комплектації, відсутність інформаційного блоку. Розробляються сімейство діагностичного та іншого сервісного обладнання, техніко-економічні моделі та методи підвищення ефективності використання ТС ВА на основі оптимізації розподілу механізованих та ремонтно-обслуговуючих робіт між виконавцями, обґрунтування виробничих параметрів станцій та їх структур з ТС машин та обладнання.

Велике значення питанням організації обслуговування, діагностування, спеціалізованого ТО та ТД, створення форм та засобів ТО надається і за кордоном. Наявність спеціалізованих діагностичних станцій у Франції, Німеччині, США та Канаді дозволило знизити повернення машин після обслуговування на 90% та скоротити час перебування на ПТС при ТО та ТД від 0,5 до 0,15 години.

Система ТС, дозволяє підвищити ефективність використання ВА за рахунок узгодженої роботи різних ланок та покращення нормативно-документального (НДЗ) і інформаційного забезпечення (ІЗ). Зазначене враховано і було виділено підсистему завдань ТС, на вирішення яких істотно впливає розроблені НДЗ та ІЗ. Схему взаємодії завдань ТС та НДЗ і ІЗ наведено на рис. 1.

Аналіз рис.1 свідчить, що функціонування підсистеми (2) залежить від сукупності налагодженого НДЗ і ІЗ. Вона зумовлює підвищення ефективності вирішення завдань (1) і (3). Визначено, що рівень впливу НДЗ і ІЗ на функціонування підсистем (4)-(9) становить 50...60 %. Функціонування підсистем (1)-(4), (5)-(9) пов'язане з підвищенням такого показника експлуатаційної надійності ВА:

напрацювання на відмову. Це підвищить ефективність ТС ВА та зменшить час простою машин за рахунок скорочення тривалості операцій ТС.

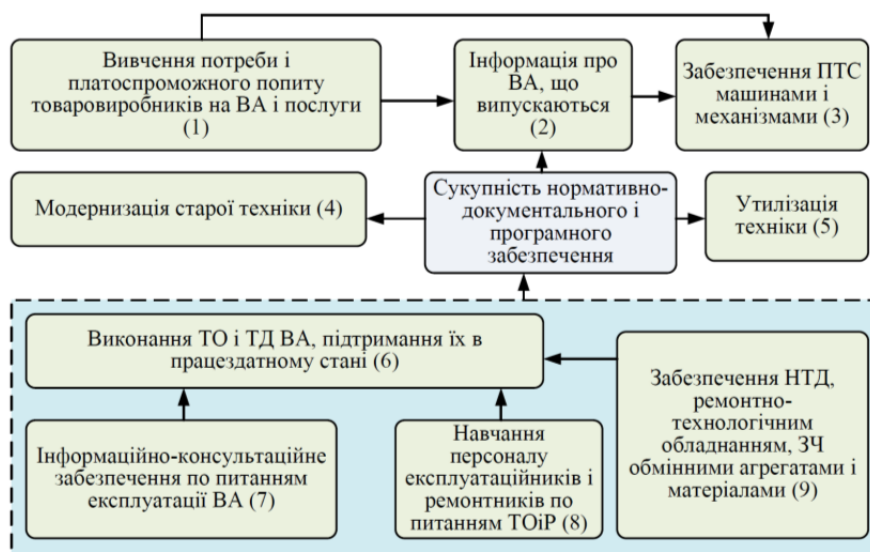


Рисунок 1– Взаємозв'язок нормативно-документального та інформаційного забезпечення та завдань якісного виконання технічного сервісу вантажних автомобілів

Джерело: розроблено авторами

У загальній структурі технологічного процесу технічного сервісу (ТС) частка НДЗ та ІЗ складає приблизно 40%. Завдяки впровадженню створеної інформаційної бази (ІБ) час, необхідний для опрацювання інформації, зменшується вдвічі, що, у свою чергу, дозволяє скоротити загальну тривалість технологічного процесу ТС орієнтовно на 20%.

Перевага надається досконалішій і ефективній схемі управління процесами ТС ВА з визначенням стану вузлів, систем і агрегатів шляхом інструментального діагностичного контролю. Ефективним перебігом в системі ТС є автоматизація управління процесом за результатами ТД вузлів, систем і агрегатів із впровадженням сучасних ІТ. Це слід реалізовувати, починаючи з бортового комп'ютера та мехатроніки ВА і закінчуючи КФС ТС.

В даній роботі запропоновано при проведенні операцій ТОiP використовувати НТД базу даних та баз знань спеціалістів (рис. 2).

Аналіз і вивчення завдань, що вирішуються в межах системи ТО, дозволили дійти висновку, що її вдосконалення повинно здійснюватися шляхом інтеграції сучасних інформаційних технологій і раціонального використання НДЗ та ІЗ.

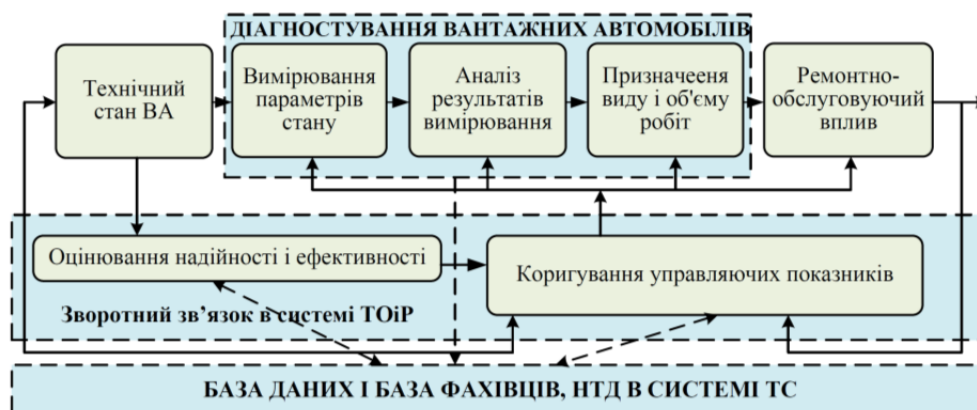


Рисунок 2 – Схема реалізації системи управління технічним станом вантажних автомобілів

Джерело: розроблено авторами

На сьогодні більшість питань, пов'язаних з технічним обслуговуванням високотехнологічного обладнання, вирішується безпосередньо оператором і значною мірою залежить від його професійного рівня. Це зумовлює актуальність розробки інтелектуальних систем підтримки діяльності оператора, орієнтованих на застосування НДЗ та ІЗ для забезпечення якісного виконання комплексу обслуговуючих операцій. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є створення експертних систем, що спеціалізуються на конкретних предметних галузях.

Головною перевагою подібних рішень є побудова інтелектуальних інформаційних систем (ІС) на основі експертного досвіду фахівців – конструкторів, інженерів-випробувачів, експлуатаційників. Насамперед мова йде про комп'ютерні функціональні системи (ФС) технічного сервісу, знання яких можна легко оновлювати та адаптувати до нових умов, а також масштабувати на інші об'єкти.

Міжнародний досвід демонструє, що створення ІС або комп'ютерні ФС, призначених для підтримки інтелектуальної діяльності персоналу, є складною науково-технічною задачею. У сфері експлуатації ВА такі питання розглядалися лише частково. Водночас на практиці їхнє впровадження ускладнюється відсутністю ефективних методів формалізації знань з предметних галузей, а також недоліком інженерних підходів до розробки таких систем. Наразі на ринку відсутні ІБД цього рівня.

Попри це, сучасні світові тенденції однозначно свідчать, що впровадження НДЗ та ІЗ у контексті життєвого циклу ТС є одним із ключових напрямів у підвищенні якості ТО. У цьому зв'язку актуальним стає створення нових методів ТО ВА з використанням інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, зокрема ІС та комп'ютерних ФС ТС.

Для конкретного підприємства є можливість розробки індивідуальної бази даних (ІБД) для ТОіР, яку можна ефективно застосовувати під час створення ІС ТО в межах будь-якого АТП.

Ефективність впровадження ІБД визначається її структурною організацією, чисельністю та складом автоматизованих робочих місць (АРМ), переліком функціональних завдань, що вирішуються, а також використовуваними технічними засобами. Застосування ІБД підвищує ефективність не лише праці персоналу, але й загальної продуктивності виробничих процесів.

Серед основних чинників, які впливають на якість роботи системи ТО, особливе значення мають оперативність та якість виконуваних операцій. Ці показники значною мірою залежать від професійної підготовки виконавців, а також наявності актуальної НТД і повної інформації щодо об'єкта обслуговування.

Оперативність обслуговування безпосередньо пов'язана з трудомісткістю робіт, під якою розуміють витрати праці на виконання певної операції або їх сукупності в конкретних умовах. Вимірюється трудомісткість у нормо-одинах – людино-годинах або людино-хвилинах – і поділяється на нормативну та фактичну.

Фактична трудомісткість t_{ϕ} визначає реальні витрати часу, необхідні виконавцю для виконання конкретної операції:

$$t_{\phi} = (t_{on} + t_{nz} + t_{oc} + t_{eid}) K_n, \quad (1)$$

де $t_{on} = t_{oc} + t_{ood}$ – оперативна тривалість часу проведення операції ТО;

t_{oc} – основна тривалість часу здійснення операції ТО;

t_{ood} – час забезпечення можливості здійснення операції

t_{nz} – підготовчо-заклучний час, що необхідний для ознайомлення фахівці (оператора) з інформацією по проведенню робіт, ТС вузлів, систем і агрегатів ВА та ін.;

t_{oc} – час для обслуговування робочого місця;

t_{eid} – час для перерви та відпочинку оператора;

K_n – кратність повторення операцій ТО.

Фактичний час виконання операцій ТО має ймовірнісну природу і його значна варіація залежить від технічного стану та терміну служби ВА, умов виконання операцій ТО і Р, обладнання, кваліфікації персоналу та інших факторів, як правило, фактичний час відрізнятиметься від нормативного. Тривалість виконання аналогічних операцій у операторів вищої кваліфікації менша, ніж у операторів, що мають нижчу кваліфікацію.

Операції ТО ВА часто виконуються з технологічно пов'язаними повторюваними операціями супутнього поточного ремонту малої трудомісткості.

Аналіз факторів низької якості виконання операцій ТС представлено у вигляді причинно-наслідкової діаграми (рис.3).

Виявлено, що дослідження причин дефектів вузлів, систем і агрегатів ВА необхідно передусім визначати за категорією "порушення технології ТО і Р операторами". Зазначене становить 35...44 % від сукупності ряду причин.

Однією з основних умов ефективної організації та виконання операцій ТОіР вантажних автомобілів (ВА) є забезпечення кожного фахівця та виконавця повним комплектом НТД і керівних матеріалів, що охоплюють усі аспекти підготовки та реалізації технічних заходів. Крім того, необхідно впроваджувати засоби автоматизованого розрахунку прогнозних і оціночних показників на основі результатів діагностики.

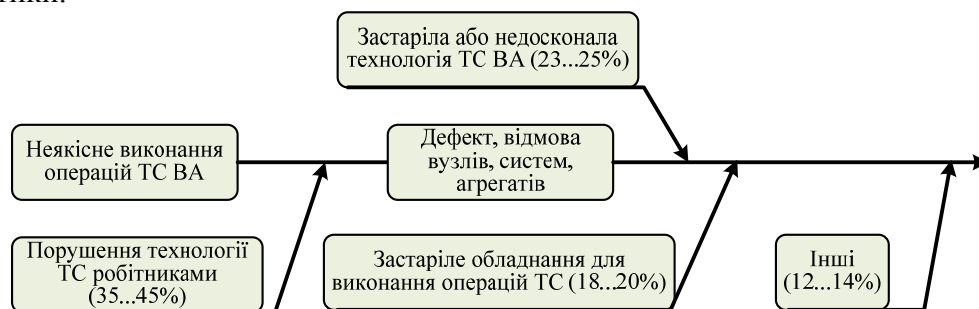


Рисунок 3 – Блок-схема причинно-наслідкової діаграми впливу факторів на виконання низької якості операцій технічного сервісу

Джерело: розроблено авторами

У зв'язку з цим однією з нагальних проблем удосконалення системи ТО і Р є інтеграція в її структуру інформаційно-консультаційного супроводу, а саме – створення бази НДЗ та ІЗ, що стосуються процесів технічного обслуговування і ремонту вантажних автомобілів.

Необхідність впровадження інформаційних ресурсів і сучасних інформаційних технологій у процес модернізації систем ТО та ТД обумовлена такими чинниками:

- зростаюча складність конструкцій вантажних автомобілів, обладнання та інструментів, що супроводжується відповідним збільшенням обсягів інформації;
- розвиток ринкових відносин, подорожчання інформаційних ресурсів і їх фрагментація у численних публікаціях, що обмежує доступ до необхідних даних для ефективного діагностування, обслуговування і прогнозування технічного стану.

Усе це зумовлює потребу в централізації релевантної інформації у спеціалізованих інформаційних відділах промислових АТП і ПТС, що дозволить істотно підвищити ефективність управління процесами ТО і Р вантажних автомобілів.

Основним завданням НДЗ і ІЗ є скорочення часу знаходження та систематизації інформації з метою задоволення інформаційних потреб фахівців, що стосується системи ТОіР. Тому актуальним є завдання створення нового інформаційного середовища НТД із КФС, заснованого на електронних ресурсах. Це дає можливість не тільки зберегти, провести пошук, передати і використати наявні знання, але й генерувати нову інформацію. Формування нового інформаційного середовища на базі комп'ютерних мереж та інтернету вимагає його більш повним і якісним наповненням

загальнодоступними базами та даними, експертними та рекомендуваними системами. Крім того вони повинні бути здатними функціонувати як загальнодоступні. При цьому забезпечується розширення інформаційного сервісу і в подальшому якісному функціонування системи ТС в КФС. У найближчій перспективі питання автоматизації та інформатизації системи технічного сервісу матимуть першорядне значення.

Подібні питання розробки НДЗ і ІЗ дотепер не мали системного фрагментарний характеру. Впровадження таких систем на практиці стримується труднощами математичної формалізації знань та невідосконалістю методів інженірингу. Належний рівень її використання ще не отримав розвитку і потребують спеціальних досліджень. До цього часу на інформаційному ринку відсутні бази такого класу.

В даний час ведуться роботи зі створення ІС обслуговування на смартфоні. Вирішено завдання формування спеціалізованої ІБД з технічної експлуатації ВА у вигляді локального інформаційного фонду (ЛПФ), що містить всі необхідні фактографічні дані, а також знання концептуально-алгоритмічного та інших видів цієї проблематики.

На даний момент розроблено ІС у вигляді трьох складових. Перші дві складові з них носять загальний характер, а третя орієнтована на рішення конкретної, цілком певної задачі квазіенциклопедії з технічної експлуатації ВА та розглядається система інформаційного супроводу ТО та ТД.

Нові інформаційні технології контролю реалізовані технічними пристроями на основі мікропроцесорної техніки та, зокрема, персонального комп'ютера (ПК). Такі технічні рішення дозволяють інтенсифікувати контроль у напрямку, або збільшення кількості контрольних операцій, або застосування апарату прогнозування для розрахунку термінів обслуговування за результатами попереднього контролю. Однак, існуючі технічні рішення з цього питання в нових режимах функціонування системи ТО і Р ВА часто не є ефективними. Тому їх необхідно вдосконалювати. З цією метою розроблено аналітичні методи проектування технологічного процесу експлуатаційного контролю в системі ТО та створено нові оперативні технічні засоби.

На теперішній час є окремі наукові розробки орієнтовані на створення певних компонентів та складових НДЗ і ІЗ фахівців інженерно-технічної системи, бази фактографічних та інших даних, що розміщуються у спеціальних центрах для того, щоб будь-який працівник галузі міг би звернутися із запитом до них для отримання відповідної інформації. Водночас система НДЗ і ІЗ має бути доповнена локальними інформаційними фондами, подібно до того, коли поряд з великими бібліотеками існують невеликі бібліотеки різних підприємств і навіть особисті бібліотеки, які успішно виконують багато функцій НДЗ і ІЗ різних категорій працівників.

Зібрано та систематизовано інформаційний матеріал про ремонтно-технологічне обладнання (РТО), що випускається підприємствами України, та розроблену НТД з обслуговування ВА, і дозріла необхідність сформувати окремим блоком інформаційний матеріал процесів ТО ВА. Розроблені заходи щодо підвищення ефективності сервісного обслуговування АТП за рахунок встановлення виробничих параметрів та складу центральної ремонтно-технічної бази, покращення кадрового забезпечення на підставі розподілу та організації робіт з технічного сервісу.

По НДЗ і ІЗ інженерно-технічної сфери розроблено методологію створення інформаційних систем, що дозволяє реалізувати в єдиному інформаційному середовищі автоматизований інформаційний супровід ВА протягом його повного життєвого циклу (тобто CALS-технології). Розроблено також узагальнений метод формування та використання баз даних на основі знань фахівців, що включає в себе: методики оцінки та відбору експертів; методику оцінки та відбору інформації для формування БД; методику розподілу документів за тематиками та їх значущістю; методику пошуку необхідної та достатньої для фахівця інформації. При цьому програмні продукти дозволяють фахівцям та керівнику АТП, ПТС отримувати необхідну та достатню

інформацію для прийняття правильних та ефективних рішень.

В основу розроблених програм для ПК, закладено принцип діагностування, заснований на аналізі вихідних динамічних характеристик об'єкта. Програма дозволяє переглядати будь-яку обрану ділянку осцилограми шляхом її укрупнення. Основна відмінність даного діагностичного комплексу полягає в тому, що програма, встановлена в будь-який персональний комп'ютер з невеликою кількістю елементів, що перетворюють. Це дозволяє не просто візуально спостерігати за процесами в діагностованих об'єктах, але аналізувати і робити висновок за результатами діагностики. Висновок визначається без участі оператора, що дозволяє уникнути помилок, пов'язаних з його кваліфікацією та досвідом, а вартість такого обладнання значно нижча за вартість стаціонарних мотор-тестерів.

На кафедрі експлуатації та ремонту машин розроблено теоретичні основи ТД агрегатів та систем ВА, що реалізують принципи автоматичного управління ймовірними методами у складі об'єднаної діагностичної системи (ОДС), до якої входять безліч оснащених локальними діагностичними комплексами (ЛДК) постів діагностування. У процесі виведення діагностики на окремому посту відбувається обмін інформацією з іншими постами через сервер ОДС. Результати діагностування накопичуються та обробляються, стаючи невід'ємною частиною самої діагностичної системи.

Така накопичена інформація дає уявлення про вік ВА, проведені операції ТО і Р. А особливо вона важлива, коли несправність є наслідок неправильно виконаного оператором операцій ТО і РР. Це дозволяє формувати апіорну інформацію про об'єкти, аналогічні не тільки за модифікаціями, але й за умовами технічної експлуатації.

Одним з методів та способів підвищення якості проведення операцій з ТО і Р ВА, з наявними на сьогоднішній день технічними засобами та працівниками різної кваліфікації, пропонується використання ІС та методів ІІІ прийняття рішень. При цьому застосовуються нові ІТ. З'ясовано наукові основи формування системи інформаційної підтримки ТО і Р ВА та ефективне використання обладнання виробничого підприємства, прийоми формування ІБ ТО і Р та її оптимізація при управлінні ТО і Р. Одним із способів оптимізації ІС пропонується загальний файловий блок-генератор, який здатний створювати шаблони документів.

Розглядалися питання ІЗ при організації та проведенні ТО автомобілів, досліджувалися джерела та методи отримання інформації, а також використання комп'ютерної та мережевої техніки при управлінні виробництвом АТП. Встановлено, що інтранет та інтернет-технології з переходом до мережових комп'ютерних технологій забезпечують оперативний обмін інформації, що сприяє підвищенню ефективності робіт на підприємствах ТОіР при значному зниженні трудовитрат;

В напрямку дослідження методів комп'ютерної діагностики ВА проводилися роботи зі створення стендів модульного типу, що реалізують енергозберігаючі методи діагностування гальмівних якостей сучасних автомобілів, у т.ч. і з антиблокувальними системами. Об'єднано у єдину інформаційну мережу сукупність діагностичної інформації, отриманої від багатьох об'єктів та засобів діагностування, автоматизовано технологію діагностування.

Проведено удосконалення фірмового обслуговування автомобілів у дилерсько-сервісних центрах з використанням ІБ. Розроблена ІС дилерсько-сервісного центру для забезпечення можливості вибору раціональних рішень з управління складною системою фірмового обслуговування автомобілів на основі аналізу статистичної інформації та комп'ютерного експерименту на імітаційній моделі.

Показано, що удосконалення управління якістю ТО можливо проводити на основі застосування нової ІТ. Шляхи підвищення ефективності обробки інформації при управлінні якістю ТО проводили на основі розробки та застосування ІТ, що адаптується до специфіки діяльності АТП і ПТС шляхом розробки програмного комплексу на ПК

для комп'ютерного НДЗ і ІЗ системи управління якістю проведення операцій ТО.

Розроблено кілька версій програми "АвтоКаталог", що представляє собою довідково-інформаційну систему. АвтоКаталог є електронним каталогом запчастин, комп'ютерним довідником з інформацією про налаштування різних марок автомобілів. Але водночас цей каталог не містить усієї інформації, необхідної для проведення технологічних процесів ТО автомобілів. В програмі відображені основні аспекти НДЗ і ІЗ технічної експлуатації ВА. Зазначимо, що спеціальні дослідження з нормативно-документальної підтримки ТО ВА, ще не були проведені в джерелах інформації, в яких представлені описи виконання операцій ТО і ТД, слюсарно-монтажних інструментів, контрольно-вимірювальних приладів, витратних матеріалів у відповідності до нормативних потреб.

Для спрощення технологічної інформації та НДЗ і ІЗ робочого місця оператора за видами робіт ТО автомобілів розроблені операційні карти, які включають певні компоненти інформації по ТО автомобілів. Однак отримані зазначені матеріали в багатьох випадках мають узагальнений характер, а тому користувач повинен добре володіти відомостями про особливості проведення операцій ТО стосовно конкретної моделі автомобілів. Це зумовлює досить високий рівень підготовки спеціаліста (оператора) з обслуговування автомобілів. Дані матеріали ще не достатньо не досконалі, потребують доповнення новою інформацією з урахуванням модернізації та внесення конструктивних змін до автомобіля. Крім того, операції ТД та ТО необхідно коректно взаємопов'язувати в процесі ТС автомобілів.

Висновки.

1. Визначено, що раціональна організація технічного обслуговування і операцій технічного діагностування дає можливість скоротити тривалість проведення ТО на 8...12%, збільшити напрацювання на автомобіль на 20...28%, підвищити його продуктивність на 34...46%. Застосування технічної діагностики сприяє підвищенню міжремонтного ресурсу вантажних автомобілів у 1,3...1,5 рази, зниженню частоти відмов у 2,0...2,5 рази, а також забезпечує економію палива на рівні 5...8%.

2. Встановлено, що ефективність проведення операцій з технічного обслуговування та технічного діагностування вантажних автомобілів безпосередньо залежить від професійної підготовки та практичного досвіду виконавців (операторів), а також від забезпеченості повним комплектом нормативно-технічної документації щодо об'єкта обслуговування та наявності методичних матеріалів, які регламентують організацію й виконання обслуговування. Додатковим чинником виступає наявність інструментів для автоматизованого розрахунку прогнозних і оціночних показників на основі результатів діагностичних процедур.

3. Виявлено, що наявне інформаційне забезпечення процесів технічного обслуговування та діагностування вантажних автомобілів є недостатньо ефективним та вимагає комплексної модернізації. Рекомендовано впровадження системного підходу на основі концепції кіберфізичних систем, зокрема створення інтегрованої кіберфізичної інфраструктури в сфері автомобільного транспорту, технічного сервісу та обслуговування. Існуюча система нормативно-технічної документації повинна бути представлена як інтегративна і об'єднана в єдине ціле застосуванням новітніх ефективних інформаційних технологій та використанням прогресивного програмного забезпечення.

4. Аналіз сучасних розробок у сфері інформаційного забезпечення та управління системами технічного сервісу парку вантажних автомобілів свідчить, що вони здебільшого охоплюють окремі аспекти підвищення технічної ефективності та сервісного обслуговування. Основна увага в них зосереджена на створенні ізольованих функціональних елементів інформаційного забезпечення для фахівців інженерно-технічної служби. Водночас цілеспрямовані дослідження з формування комплексної

системи інформаційного управління та підтримки процесів технічного обслуговування вантажних автомобілів залишаються недостатньо опрацьованими.

5. Що стосується питань розробки комп'ютеризованого нормативно-документального забезпечення, то вони розглядаються фрагментарно. Створення і впровадження таких інформаційних систем обумовлюється недостатньою формалізацією знань з теорії технічної експлуатації і сервісу вантажних автомобілів, а також спостерігається відсутність ефективних методів побудови таких систем. В даній роботі наголошується на необхідності розробки комплексу комп'ютеризованого нормативно-документального забезпечення проведення операцій технічного сервісу вантажних автомобілів з розробкою відповідних їх алгоритмів.

Список літератури

1. Аулін В. В., Бруцький О. П. Забезпечення та підвищення експлуатаційної надійності транспортних засобів на основі використання методів теорії чутливості. *Вісник інженерної академії України*. 2015. №3. С. 66–72.
2. Аулін В. В., Гриньків А. В. Методика вибору діагностичних параметрів технічного стану транспортних засобів на основі теорії сенситивів. *Науковий журнал Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2016. №5. С. 109–116.
3. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О. Кіберфізичний підхід при створенні, функціонуванні та удосконаленні транспортно-виробничих систем. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. №3(34). С. 331–343.
4. Аулін В. В., Гриньків А. В. Кіберфізичний підхід в дослідженні стану технічних систем. *Підвищення надійності машин і обладнання*. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 15–17 квітня 2020 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 168–169.
5. Аулін В. В., Замота Т. М., Гриньків А. В., Лисенко С. В., Крупиця О. В., Панайотов К. К. Обґрунтування використання сучасних підходів для вдосконалення діагностування систем та агрегатів автомобіля. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. №2(33). С. 65–75.
6. Ван Чунжі, Яцишин С. П., Лиса О. В., Мідик А.-В. В. Кіберфізичні системи та їх програмне забезпечення. *Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. Том 79, №1. С. 34–38.
7. Голембо В., Бочкарьов О. Підходи до побудови концептуальних моделей кіберфізичних систем. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Серія Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. №864. С. 168–178.
8. Волков В. П. та ін. Інформаційні системи моніторингу технічного стану автомобілів. Харків: ФЛП Панов А. М., 2018. 299 с.
9. Мельник А. О., Мельник В. А., Глухов В. С., Сало А. М. Кіберфізичні системи: багаторівнева організація та проектування. Львів: Магнолія 2006, 2024. 238 с.
10. Матейчик В. П. та ін. Особливості моніторингу стану транспортних засобів з використанням бортових діагностичних комплексів. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2014. №13. С. 126–138.
11. Павленко В. М., Кужель В. П., Хорін М. Є. Сутність автомобільної діагностики при впровадженні експертних систем. *Вісник машинобудування*. 2020. №2(12). С. 85–92.
12. Аулін В. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. та ін. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2020. №22. С. 162–174.
13. Сахно В. П., Біліченко В. В., Іванушко О. М. Визначення вагових коефіцієнтів для побудови математичної моделі коректування періодичності проведення технічного обслуговування і ремонту. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця: ВНТУ, 2017. №2(6). С. 141–149.
14. Сахно В. П., Іванушко О. М. Вплив умов експлуатації та системи технічного обслуговування і ремонту на технічний стан автотранспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету. Серія Технічні науки*. Київ: НТУ, 2017. №1(37). С. 363–372.
15. Сахно В. П., Іванушко О. М. Коректування періодичності технічного обслуговування автотранспортних засобів з метою попередження більшості відмов. *Вісник Національного транспортного університету. Серія Технічні науки*. Київ: НТУ, 2019. №1(43). С. 167–177.
16. Aulin Victor, Lyashuk Oleg, Lysenko Serhii, Tson Oleg, Hrynkiv Andrii, Rozhko Nataliia. Extension of the service term of the resource-determining elements of vehicle units based on the artificial neural network model of their defects. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. Pp. 436–443.
17. Aulin Victor, Mytnyk Mykola, Hrynkiv Andrii, Holovaty Artem, Lysenko Sergii, Plekan Uliana. Prediction of recognized defect combinations in the parts of automobile units, systems, and assemblies using artificial neural network method. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. Pp. 444–451.
18. Marjani M. et al. Big IoT Data Analytics: Architecture, Opportunities, and Open Research Challenges. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. Pp. 5247–5261.

19. Shibaev D. S. et al. Data Control in the Diagnostics and Forecasting the State of Complex Technical Systems. *Herald of Advanced Information Technology*. 2019. Vol. 2. Iss. 3. Pp. 183–196.
20. Dubois D., Prade H. Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty. New York: Plenum Press, 1988. 280 p.
21. Gayathri T. A Survey on Vehicle Health Monitoring and Prediction System. *International Journal of Computer Science Trends and Technology*. 2017. Vol. 5. Iss. 3. Pp. 191–193.
22. Horvath I., Gerritsen B. H. M. Cyber-Physical Systems: Concepts, technologies and implementation principles. *Proceedings of TMCE 2012*. 2012. Pp. 19–36.
23. Jianjun S. et al. The analysis of traffic control Cyber-physical systems. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2013. Vol. 96. Pp. 2487–2496.
24. Khaitan et al. Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey. *IEEE Systems Journal*. 2014. Vol. 9, No. 2. Pp. 1–16.
25. Do P. et al. Multi-agent deep reinforcement learning-based maintenance optimization for multi-dependent component systems. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 245. Article 123144.
26. Naryal E., Kasliwal P. Real time vehicle health monitoring and driver information display system based on CAN and Android. *International Journal of Advance Foundation and Research in Computer*. 2014. Vol. 1, No. 11. Pp. 76–84.
27. Gritsuk I. et al. The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units. *SAE Technical Paper*. 2018.
28. Shafi U. et al. Vehicle Remote Health Monitoring and Prognostic Maintenance System. *Journal of Advanced Transportation*. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–10.

References

1. Aulin, V. V., & Brutskiy, O. P. (2015). Ensuring and increasing operational reliability of vehicles based on the use of sensitivity theory methods. *Visnyk Inzhenernoyi Akademiyi Ukrayiny*, (3), 66–72.
2. Aulin, V. V., & Hryn'kiv, A. V. (2016). Methodology for selecting diagnostic parameters of technical condition of vehicles based on sensitivity theory. *Scientific Journal "Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes"*, (5), 109–116. Kharkiv: KhNTUSG.
3. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., & Holovaty, A. O. (2020). Cyber-physical approach in creation, functioning, and improvement of transport-production systems. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 3(34), 331–343.
4. Aulin, V. V., & Hryn'kiv, A. V. (2020). Cyber-physical approach in research of technical systems condition. In *Increase of machine and equipment reliability: materials of the International scientific-practical conference* (pp. 168–169). Kropyvnytskyi: CNTU.
5. Aulin, V. V., Zamota, T. M., Hryn'kiv, A. V., Lysenko, S. V., Krupytsia, O. V., & Panaiotov, K. K. (2019). Justification of using modern approaches to improve diagnostics of vehicle systems and units. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 2(33), 65–75.
6. Van Chunji, Yatsyshyn, S. P., Lysa, O. V., & Midyk, A.-V. V. (2018). Cyber-physical systems and their software. *Measurement Techniques and Metrology: Interdepartmental Scientific and Technical Collection*, 79(1), 34–38. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing.
7. Holembo, V., & Bochkariov, O. (2017). Approaches to building conceptual models of cyber-physical systems. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: Computer Science and Information Technologies*, (864), 168–178. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing.
8. Volkov, V. P., et al. (2018). *Information systems for monitoring the technical condition of vehicles* (299 p.). Kharkiv: FLP Panov A. M.
9. Melnyk, A. O., Melnyk, V. A., Hlukhiv, V. S., & Salo, A. M. (2024). *Cyber-physical systems: multi-level organization and design* (Monograph). Lviv: Magnolia 2006.
10. Mateichyk, V. P., et al. (2014). Features of vehicle condition monitoring using onboard diagnostic systems. *Project Management, Systems Analysis and Logistics*, (13), 126–138.
11. Pavlenko, V. M., Kuzhel, V. P., & Khorin, M. Ye. (2020). Essence of automobile diagnostics in implementation of expert systems. *Machinery Bulletin*, 2(12), 85–92.
12. Aulin, V. V., Hryn'kiv, A. V., Lysenko, S. V., et al. (2020). Principles of construction and functioning of cyber-physical technical service systems for automotive and mobile agricultural machinery. *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, (22), 162–174. Kharkiv: KhNTUSG.
13. Sakhno, V. P., Bilichenko, V. V., & Ivanushko, O. M. (2017). Determination of weight coefficients for building a mathematical model to correct the periodicity of maintenance and repair. *Machinery and Transport Bulletin*, 2(6), 141–149. Vinnytsia: VNTU.
14. Sakhno, V. P., & Ivanushko, O. M. (2017). Impact of operation conditions and maintenance systems on the technical condition of vehicles. *Bulletin of National Transport University. Technical Sciences Series*, 1(37), 363–372. Kyiv: NTU.
15. Sakhno, V. P., & Ivanushko, O. M. (2019). Correction of vehicle maintenance periodicity to prevent most failures. *Bulletin of National Transport University. Technical Sciences Series*, 1(43), 167–177. Kyiv: NTU.
16. Aulin, V., Lyashuk, O., Lysenko, S., Tson, O., Hryn'kiv, A., & Rozhko, N. (2024). Extension of the service term of the resource-determining elements of vehicle units based on the artificial neural network model of their defects. *Procedia Structural Integrity*, 59, 436–443.

17. Aulin, V., Mytnyk, M., Hryn'kiv, A., Holovaty, A., Lysenko, S., & Plekan, U. (2024). Prediction of recognized defect combinations in parts of automobile units, systems, and assemblies using artificial neural network method. *Procedia Structural Integrity*, 59, 444–451.
18. Marjani, M., Nasaruddin, F., Gani, A., Karim, A., Hashem, I. A. T., Siddiq, A., & Yaqoob, I. (2017). Big IoT data analytics: Architecture, opportunities, and open research challenges. *IEEE Access*, 5, 5247–5261.
19. Shibaev, D. S., Sokolov, V. V., & Samokhin, A. A. (2019). Data control in diagnostics and forecasting the state of complex technical systems. *Herald of Advanced Information Technology*, 2(3), 183–196.
20. Dubois, D., & Prade, H. (1988). *Possibility theory: An approach to computerized processing of uncertainty*. New York: Plenum Press.
21. Gayathri, T. (2017). A survey on vehicle health monitoring and prediction system. *International Journal of Computer Science Trends and Technology*, 5(3), 191–193.
22. Horvath, I., & Gerritsen, B. H. M. (2012). Cyber-physical systems: Concepts, technologies and implementation principles. In *Proceedings of TMCE 2012* (pp. 19–36).
23. Jianjun, S., & coauthors. (2013). The analysis of traffic control cyber-physical systems. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 2487–2496.
24. Khaitan, S. K., & coauthors. (2014). Design techniques and applications of cyber-physical systems: A survey. *IEEE Systems Journal*, 9(2), 1–16.
25. Do, P., & coauthors. (2024). Multi-agent deep reinforcement learning-based maintenance optimization for multi-dependent component systems. *Expert Systems with Applications*, 245, Article 123144.
26. Naryal, E., & Kasliwal, P. (2014). Real-time vehicle health monitoring and driver information display system based on CAN and Android. *International Journal of Advance Foundation and Research in Computer*, 1(11), 76–84.
27. Gritsuk, I., & coauthors. (2018). The complex application of monitoring and express diagnosing for searching failures on common rail system units. *SAE Technical Paper*.
28. Shafi, U., & coauthors. (2018). Vehicle remote health monitoring and prognostic maintenance system. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 1–10.

Taras Nadych, Viktor Aulin, Prof., Dr. Tech. Sci., **Andrii Hryn'kiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Viktor Slon**, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Methods and Measures for Improving the Technical Service System of Trucks Based on a Cyber-Physical Approach and the Development of Scientific and Technical Documentation of its Operations

The article is devoted to the information support system for carrying out technical maintenance operations, technical diagnostics and current repairs of trucks at technical service enterprises. The issue of integrating scientific and technical documentation for carrying out technological operations of technical service of trucks, according to the principles of the cyber-physical approach, a single information space, is considered.

New possibilities of the technical service system of trucks with the development of intelligent information technologies and the cyber-physical approach, when a single information space is formed, are clarified. The relationship of regulatory and documentary and information support with the tasks of technical service of trucks is given. It is determined that their share in the entire technological process of technical service is on average 40%, and the developed information base leads to a reduction in its duration by 20%.

A scheme for implementing a system for managing the technical condition of trucks is developed. The role of the operator in the efficiency and reliability of the provision of technical service operations and the growth of requirements in the case of including the technical service system in the unified information space of the cyber-physical system are shown. It is determined that the effectiveness of the information database depends on its structure, number and composition of automated workplaces. The information support system for technical maintenance and technical diagnostics, the methodology for creating an information system using the cyber-physical approach of the unified information space are clarified. The influence of such a space and artificial intelligence methods of decision-making on the quality of technical service services for trucks is shown. It is established that intranet and Internet technologies with the transition to network computer technologies provide operational accounting of information, which contributes to increasing the efficiency of technical maintenance and repair work at road transport enterprises and technical service enterprises with a significant reduction in labor costs. A version of the "AutoCatalog" program has been developed, which is a reference and information system and concerns trucks, their design and technological operations of technical service.

truck, technical condition, technical service, cyber-physical approach, information space, scientific and technical documentation, database

Одержано (Received) 12.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 15.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

УДК 629.3.017

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.328-334](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.328-334)

М. А. Подригало, проф., д-р техн. наук, **О. С. Полянський**, проф., д-р техн. наук,
Є. О. Дубінін, проф., д-р техн. наук, **М. В. Краснокутський**, **В. А. Литвин**
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна
e-mail: dubinin-rmn@ukr.net

Раціональне управління динамікою повороту задньопривідного автомобіля з мотор-колесами

1. У дослідженні розглянуто питання підвищення керованості колісних машин, запропоновано підвищити керованість задньопривідного автомобіля з мотор-колесами при повороті за рахунок усунення нелінійності типу «зони нечутливості». Запропоновано використовувати калібровану систему, що має два ступені свободи, з можливістю використання спільно кінематичного та динамічного способу повороту. В результаті отримано рівняння, що дозволяє організувати управління поворотом задньопривідного автомобіля з мотор-колесами за умови відсутності нелінійності типу «зона нечутливості». Для реалізації вказаного повороту необхідно проводити вимірювання маси автомобіля, коефіцієнта опору кочення коліс, середнього кута повороту напрямних коліс, положення центру мас автомобіля, крутних моментів на задніх привідних колесах. Отримані результати мають важливе значення для поліпшення керованості колісних машин, забезпечуючи безпеку та надійність їхньої експлуатації.

колісна машина, керованість, зона нечутливості, управління поворотом

Постановка проблеми. Застосування мотор-коліс (електричних та гідравлічних) на автомобілях з комбінованими силовими установками дозволяє поліпшити керованість та маневреність останніх. Підвищити керованість автомобіля при повороті можна за рахунок застосування комбінованого способу управління, який полягає в спільному використанні напрямних коліс на передньому мосту і створенні різниці крутних моментів на колесах задніх ведучих коліс. Досліджена можливість використання моменту, що повертає, створюваного різницею крутних моментів на задніх ведучих колесах, для подолання моменту статичного опору повороту, а поворот передніх напрямних коліс використовувати для створення необхідних кінематичних параметрів повороту автомобіля. Таке рішення дозволяє при керуванні поворотом автомобіля виключити нелінійність типу "сухе тертя", що покращує керованість машини.

Тому дослідження, направлені на підвищення керованості колісних машин при виробництві та експлуатації є своєчасними та актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Маневреність є однією з найважливіших експлуатованих властивостей автомобілів та інших колісних машин. Тому дослідженню комплексної експлуатаційної властивості автомобілів маневреності, а також складових її більш простих властивостей: керованості, поворотливості і стійкості – присвячено значну кількість наукових досліджень [1-6].

Комбінований спосіб управління поворотом знайшов переважне застосування на колісних тракторах, у зв'язку з чим підвищенню маневреності колісних тракторів у такий спосіб присвячені роботи [1,2]. Запропоновано також способи та пристрої для реалізації комбінованого способу повороту [7-11]

У роботі [1] розглянута динамічна модель повороту повнопривідної колісної машини з використанням комбінованого способу управління (рис. 1).

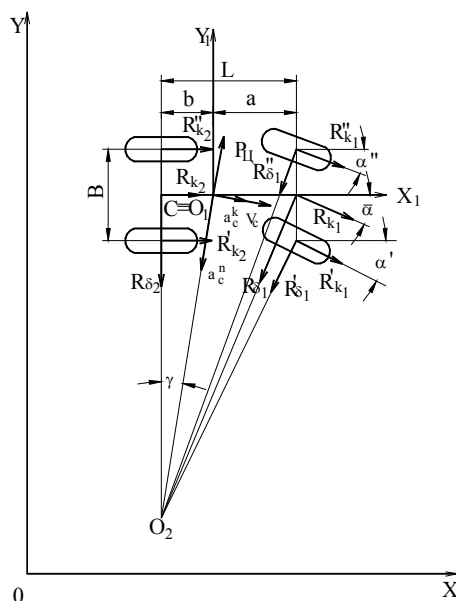


Рисунок 1 - Схема повороту чотирьохколісної повнопривідної машини з переднім напрямним мостом
Джерело: розроблено на підставі [1]

У роботі [1] отримано рівняння динаміки повороту чотирьохколісної повнопривідної машини з переднім напрямним мостом, що мають такий вигляд

$$\frac{d}{dt}(Y_{ZO_2} * \omega_z) = R''_{k_2} \left(R_2 + \frac{B}{2} \right) + R'_{k_2} \left(R_2 - \frac{B}{2} \right) + R''_{k_1} * R'_1 + R'_{k_1} * R'_1, \quad (1)$$

де Y_{ZO_2} – момент інерції автомобіля відносно центру O_2 повороту,

$$Y_{ZO_2} = m_2(i_z^2 + b^2 + L^2 \operatorname{ctg}^2 \bar{\alpha}), \quad (2)$$

де ω_z – кутова швидкість автомобіля у площині дороги;

i_z – радіус інерції автомобіля відносно вертикальної осі;

L – поздовжня колісна база автомобіля;

b – відстань від задньої осі до проекції центра мас на горизонтальну площу;

m_a – маса автомобіля;

B – колія автомобіля (приймається рівною для передньої і задньої осей);

R_2 – радіус повороту середини задньої осі автомобіля, якій визначається за формулою

$$R_2 = L * \operatorname{ctg} \bar{\alpha}, \quad (3)$$

де $\bar{\alpha}$ – серединний кут повороту напрямних передніх коліс автомобіля;

$R''_{k_1}; R'_{k_1}$ – дотичні реакції дороги на внутрішньому та зовнішньому задніх ведучих колесах автомобіля;

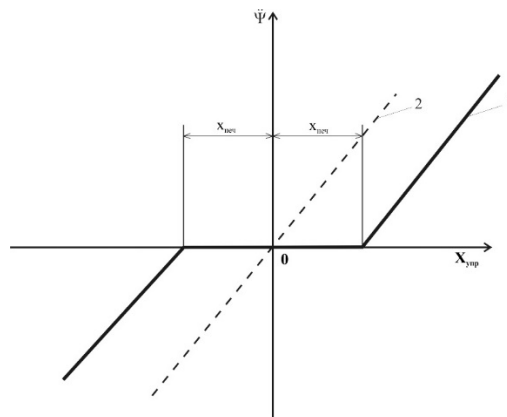
$R''_1; R'_1$ – радіуси повороту передніх внутрішнього та зовнішнього коліс.

У роботі [3] проведено аналіз всього різноманіття показників і критеріїв маневреності колісних машин. Всі вони були розділені на 3 основні групи: силові, кінематичні та енергетичні. При комбінованому способі управління створюють два керуючі впливи: силове (повертаючий момент) і кінематичне (поворот напрямних коліс).

При повороті машини функцію ланки зворотного зв'язку виконує водій. Однак

наявність статичного моменту опору повороту машини порушує пропорційність між впливом на управління кермом і кутовим прискоренням машини в площині дороги.

Кутове прискорення автомобіля в площині дороги є показником та критерієм керованості машини [1,2,3]. У дослідженнях [3,4] показано, що наявність статичного моменту опору повороту призводить до появи нелінійності типу «сухого тертя», що погіршує керованість автомобіля (рис.2)



1 – при наявності зони нечутливості; 2 – при відсутності зони нечутливості

Рисунок 2 – Залежність кутового прискорення автомобіля у площині дороги від керуючого зусилля

Джерело: розроблено на підставі [3,4]

Автомобілі з встановленими на задніх провідних колесах двигунами (мотор-колесами) дозволяють реалізувати комбінований спосіб управління поворотом при якому різниця крутних моментів на задніх провідних колесах дає можливість створити повертаючий момент, долаючи момент статичного опору повороту. У цьому випадку рульове керування автомобіля матиме характеристику без зони нечутливості, що підвищує керованість машини. (рис.2, крива 2).

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення керованості задньопривідних автомобілів з мотор-колесами за рахунок використання комбінованого способу керування.

Для досягнення ти поставленої мети необхідно вирішити задачу визначення повертального моменту, що створюється різницею крутних моментів на задніх колесах.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленої задачі розглянемо рівняння (1), яке можна перетворити до виду для задньопривідного автомобіля.

$$\frac{d}{dt}(Y_{z0_2} * \omega_z) = R''_{k_2} \left(R_2 + \frac{B}{2}\right) + R'_{k_2} \left(R_2 - \frac{B}{2}\right) + R''_{k_1} * R'_1 + R'_{k_1} * R'_1 \quad (4)$$

Прийmemo припущення (див. рис. 1)

$$R_{k_1} R_1 = R'_{k_1} * R'_1 + R''_{k_1} * R''_1, \quad (5)$$

де R_{k_1} – сумарна дотична реакція дороги на колесах передньої осі;

R_1 – радіус повороту середини передньої осі автомобіля, якій визначається за формулою

$$R_1 = \frac{R_2}{\operatorname{ctg} \bar{\alpha}} = \frac{L}{\sin \bar{\alpha}}. \quad (6)$$

Ліва частина рівняння (4) може бути представлена у вигляді

$$\frac{d}{dt}(Y_{z0_2} * \omega_z) = Y_{z0_2} \frac{d\omega_z}{dt} + \omega_z \frac{dY_{z0_2}}{dt}. \quad (7)$$

Диференціюючи рівняння (2), отримаємо

$$\frac{dY_{z02}}{dt} = -2m_2 L^2 \frac{\cos \alpha}{\sin^3 \alpha} \frac{d\bar{\alpha}}{dt}. \quad (8)$$

У рівнянні (4)

$$R'_{k_2} + R''_{k_2} = R_{k_2}, \quad (9)$$

де R_{k_2} – сумарна дотична реакція на задніх привідних колесах, яка визначається за формулою

$$M_{\text{пов}} = \frac{B}{2} (R''_{k_2} - R'_{k_2}). \quad (10)$$

Сумарна дотична реакція дороги на передніх напрямних колесах визначається за формулою

$$R_{k_1} = m_a * g f \frac{b}{L}, \quad (11)$$

де f – коефіцієнт опору качання коліс;

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

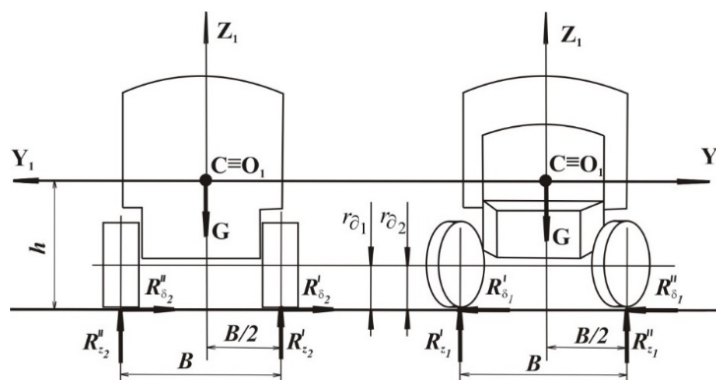
Дотична реакція дороги на задніх привідних колесах визначається за формулами

$$R'_{k_2} = \frac{M'_{k_2}}{r_{\partial}} - R'_{z_2} f; \quad (12)$$

$$R''_{k_2} = \frac{M''_{k_2}}{r_{\partial}} - R''_{z_2} f, \quad (13)$$

де $R'_{z_2}; R''_{z_2}$ – нормальні реакції дороги на внутрішньому та зовнішньому задніх привідних колесах.

Для визначення нормальних реакцій R'_{z_2} і R''_{z_2} розглянемо схему навантаження автомобіля при русі на повороті (рис.3)



а – вид ззаду; б – вид спереду

Рисунок 3 – Схема сил, діючих на автомобіль у поперечній площині при повороті

Джерело: розроблено автором

Нормальні реакції дороги на задніх колесах при повороті автомобіля (рис.3а) визначаються за формулами:

$$R'_{z_2} = 0.5m_a g \frac{a}{L} - P_{\text{ц}} \frac{a}{L} \frac{h}{B}; \quad (14)$$

$$R''_{z_2} = 0.5m_a g \frac{a}{L} + P_{\text{ц}} \frac{a}{L} \frac{h}{B}, \quad (15)$$

де a – відстань від передньої осі до проекції центру мас автомобіля на горизонтальну площину (рис.1);

$P_{\text{ц}}$ – відцентрова сила інерції, яка визначається за формулою

$$P_{\text{ц}} = m_a \omega_z^2 R_c; \quad (16)$$

R_c – радіус повороту центру мас автомобіля визначається як

$$R_c = \sqrt{R_z^2 + b^2} = \sqrt{L^2 \tan^2 \bar{\alpha} + b^2} = L \sqrt{\frac{b^2}{L^2} + \tan^2 \bar{\alpha}}. \quad (17)$$

Рівняння (14) і (15) з урахуванням співвідношення (16) і (17) приймуть вигляд

$$R'_{z_2} = 0.5m_ag \frac{a}{L} \left(1 - 2 \frac{\omega_z^2}{g} \frac{h}{B} L \sqrt{\frac{b^2}{L^2} + ctg^2 \bar{\alpha}} \right); \quad (18)$$

$$R''_{z_2} = 0.5m_ag \frac{a}{L} \left(1 + 2 \frac{\omega_z^2}{g} \frac{h}{B} L \sqrt{\frac{b^2}{L^2} + ctg^2 \bar{\alpha}} \right). \quad (19)$$

Вираз (10), з урахуванням співвідношення (12), (13), (18) і (19) прийме вигляд

$$M_{\text{пов}} = \frac{B}{2r\partial} (M''_{k_2} - M'_{k_2}) + m_afah\omega_z^2 \sqrt{\frac{b^2}{L^2} + ctg^2 \bar{\alpha}}. \quad (20)$$

З рівняння (20) визначимо

$$M''_{k_2} - M'_{k_2} = M_{\text{пов}} - \frac{m_afah\omega_z^2 \sqrt{\frac{b^2}{L^2} + ctg^2 \bar{\alpha}}}{\frac{B}{2r\partial}}. \quad (21)$$

Сумарна дотична реакція на задніх колесах R_{k_2} може бути визначена як

$$R_{k_2} = \frac{M''_{k_2} + M'_{k_2}}{r\partial} - m_agf \frac{a}{L}. \quad (22)$$

Рівняння (4) з урахуванням співвідношень (5), (6), (7), (8), (20) і (22) прийме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_z}{dt} = & \frac{2 \operatorname{cosec} 2\bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}} \omega_z \frac{d\bar{\alpha}}{dt} + \frac{M''_{k_2} + M'_{k_2}}{m_a * r\partial L} * \frac{tg\bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}} - \frac{gf}{L^2} * \frac{a * tg\bar{\alpha} + 2b * \operatorname{cosec} 2\bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}} - \\ & \omega_z^2 \frac{ahf}{L^2} t g \bar{\alpha} * \frac{\sqrt{1 + \frac{b^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}} + \frac{M''_{k_2} - M'_{k_2}}{m_a * r\partial} * \frac{B}{2L^2} * \frac{t g^2 \bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Використовуючи метод парціальних прискорень, представимо рівняння (23) у вигляді

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \mathcal{E}_{\text{кер.}} + \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_{\omega_z} + \mathcal{E}_{\text{Мпов}}, \quad (24)$$

де $\mathcal{E}_{\text{кер.}}$ – парціальне кутове прискорення, викликане дією керуючого впливу $\frac{d\bar{\alpha}}{dt}$ у кермовому управлінні визначається за формулою

$$\mathcal{E}_{\text{кер.}} = \frac{2 \operatorname{cosec} 2\bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}} \omega_z \frac{d\bar{\alpha}}{dt}; \quad (25)$$

$\mathcal{E}_1$ – парціальне кутове прискорення, викликане дією моментів на задніх ведучих колесах визначається за формулою

$$\mathcal{E}_1 = \frac{M''_{k_2} + M'_{k_2}}{m_a * r\partial * L} * \frac{tg\bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}}; \quad (26)$$

$\mathcal{E}_2$ – парціальне кутове прискорення, викликане дією сил опору коченню коліс автомобіля визначається за формулою

$$\mathcal{E}_2 = \frac{gf}{L^2} * \frac{a * tg\bar{\alpha} + 2b * \operatorname{cosec} 2\bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}}; \quad (27)$$

$\mathcal{E}_{\omega_z}$ – парціальне кутове прискорення, обумовлено дією відцентрового прискорення, прикладеного у центрі мас

$$\mathcal{E}_{\omega_z} = \omega_z^2 \frac{ahf}{L^2} t g \bar{\alpha} * \frac{\sqrt{1 + \frac{b^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}}; \quad (28)$$

$\mathcal{E}_{\text{Мпов}}$ – додаткове парціальне кутове прискорення, викликане дією повертаючого моменту $M_{\text{пов}}$, визначається за формулою

$$\mathcal{E}_{\text{Мпов}} = \frac{M''_{k_2} - M'_{k_2}}{m_a * r\partial} * \frac{B}{2L^2} * \frac{t g^2 \bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}}; \quad (29)$$

Для забезпечення високих показників керування автомобіля необхідно вибрати зону нечутливості (див. рис.2). Для цього необхідно виконання умови

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \mathcal{E}_{\text{кер.}} = \frac{2 \operatorname{cosec} 2\bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}} \omega_z \frac{d\bar{\alpha}}{dt}, \quad (30)$$

Останнє можливо при

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_{\omega_z} + \mathcal{E}_{\text{МПОВ}} = 0. \quad (31)$$

З рівняння (31) визначимо

$$\mathcal{E}_{\text{МПОВ}} = \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_{\omega_z} - \mathcal{E}_1. \quad (32)$$

Підставляючи вирази (27), (28) і (26) у рівняння (31), отримаємо

$$\mathcal{E}_{\text{МПОВ}} = \frac{gf}{L^2} * \frac{a * t g \bar{\alpha} + 2b * \operatorname{cosec} 2\bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}} + \omega_z^2 \frac{ahf}{L^2} t g \bar{\alpha} * \frac{\sqrt{1 + \frac{b^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}} - \frac{M''_{k_2} + M'_{k_2}}{m_a * r \partial * L} * \frac{t g \bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}} = \frac{M''_{k_2} - M'_{k_2}}{m_a * r \partial} * \frac{B}{2L^2} \frac{t g^2 \bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}}. \quad (33)$$

З рівняння (33) визначимо необхідну різницю крутних моментів на задніх привідних колесах

$$\Delta M_k = M''_{k_2} - M'_{k_2} = 2 \left[\frac{\frac{m_a * r \partial * gf}{B * t g^2 \bar{\alpha}} (a t g \bar{\alpha} + 2b \operatorname{cosec} 2\bar{\alpha}) + \omega_z^2 \frac{m_a * r \partial * ahf}{t g \bar{\alpha}} \sqrt{1 + \frac{b^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}} - \frac{L}{B t g \bar{\alpha}} (M''_{k_2} + M'_{k_2})}{\frac{B}{2L^2} \frac{t g^2 \bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} t g^2 \bar{\alpha}}} \right]. \quad (34)$$

Отже, отримано рівняння (34), що дозволяє організувати управління поворотом задньопривідного автомобіля з мотор-колесами за умови відсутності нелінійності типу «зона нечутливості». Для реалізації умови (34) необхідно виміряти такі параметри: масу автомобіля m_a ; коефіцієнт опору кочення f ; середній кут повороту напрямних коліс $\bar{\alpha}$; координати центру мас автомобіля a, b, h ; крутні моменти на задніх привідних колесах M''_{k_2}, M'_{k_2} .

Висновки. В результаті проведеного дослідження запропоновано підвищити керованість задньопривідного автомобіля з мотор-колесами при повороті за рахунок усунення нелінійності типу «зони нечутливості». Для вирішення зазначеної задачі запропоновано використати калібровану систему, що має два ступені свободи, з можливістю використання спільно кінематичного та динамічного способу повороту.

2. В результаті проведеного дослідження отримано рівняння, що дозволяє організувати управління поворотом задньопривідного автомобіля з мотор-колесами за умови відсутності нелінійності типу «зона нечутливості». Для реалізації вказаного повороту необхідно проводити вимірювання маси автомобіля, коефіцієнта опору кочення коліс, середнього кута повороту напрямних коліс, розташування центру мас автомобіля, крутні моменти на задніх привідних колесах.

Список літератури

1. Бобошко О. А. Підвищення маневреності колісних тракторів і самохідних шасі: автореф. дис. на здобуття наук ступеня канд техн наук: 05.02.02 .Харків, 2002. 20с.
2. Бобошко О. А. Наукові основи підвищення показників автомобілів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.02.02. Харків, 2019. 40 с.
3. Гармаш В.П. Поліпшення маневреності колісних машин шляхом використання роздільного приводу коліс поворотного мосту: дис. канд. техн. наук: 274. – Харків. нац. автом-дор. ун-т. Харків, 2023. 189 с.
4. Подригало М.А. Підвищення маневреності колісного транспортного засобу шляхом вдосконалення способу управління поворотом. *Вісник національного технічного університету "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР.* 2023. Вип. 1. С. 68-75.
5. Траяновська. У.П., Пожидаєв С.П. Моделювання криволінійного руху колісних та гусеничних тракторних агрегатів: монографія. Київ, АграрМедіаГруп, 2013. 303 с.
6. Експлуатаційні властивості автотранспортних засобів: маневреність. керованість. стійкість: навч. посіб./ В.П. Сахно та ін. - Донецьк: ЛАНДОН-XXI, 2015. 400 с.
7. Спосіб керування поворотом транспортного засобу: пат. 40814 Україна : МПК В60Т1/00.

- №u200813743 ; заявл.28.11.2008 ; опубл. 27.04.2009. Бюл. №8.
8. Спосіб керування поворотом транспортного засобу: пат. 100077 Україна : МПК B60T1/00 №u214414120 ; заявл. 29.12.2014 ; опубл. 10.07.2015. Бюл.№3.
9. Система повороту вантажного автомобіля : пат. 102955 Україна МПК B62Д 11/08 №u201505337 ; заявл. 02.06.2015 ; опубл. 25.11.2015. Бюл. №22.
10. Система управління колесами ведучого моста при динамічному способі управління транспортним засобом : пат. 110465 Україна МПК B62Д 11/09 №u201603649 ; заявл. 06.04.2016 ; опубл. 10.10.2016 ; Бюл. №19.
11. Система підвищення маневреності вантажного автомобіля: пат. 100699 Україна МПК B60Т 13/26 №u201560330 ; заявл. 16.01.2015 ; опубл. 10.08.2015. Бюл. №15.

References

1. Boboshko, O.A. (2002). *Pidvyshchennia manevrenosti kolisnykh traktoriv i samokhidnykh shasi: avtoref. dys. na здobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: 05.02.02*. Kharkiv [in Ukrainian].
2. Boboshko, O.A. (2019). *Naukovi osnovy pidvyshchennia pokaznykiv avtomobiliv: avtoref. dys. na здobuttia nauk. stupenia dokt. tekhn. nauk: spets. 05.02.02*. Kharkiv [in Ukrainian].
3. Harmash, V.P. (2023). *Polipshennia manevrenosti kolisnykh mashyn shliakhom vykorystannia rozdil'noho pryvoda kolis povorotnoho mostu: dys. kand. tekhn. nauk*. Kharkiv: Kharkivskiy nats. avtomobil'no-dorozhnyi un-t [in Ukrainian].
4. Podryhalo, M.A., et al. (2023). *Pidvyshchennia manevrenosti kolisnoho transportnoho zasobu shliakhom vdoskonalennia sposobu upravlinnia povorotom. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR, (1), 68–75* [in Ukrainian].
5. Traianovs'ka, U.P., & Pozhydaiev, S.P. (2013). *Modeliuvannia kryvoliniinoho rukhu kolisnykh ta husenychnykh traktornykh ahr. hativ: monohrafiia*. Kyiv: AhrarMediaHrup [in Ukrainian].
6. Sakhno, V.P., et al. (2015). *Ekspluatatsiini vlastyvoli avtotransportnykh zasobiv: manevrenist', kerovanyist', stiikist': navch. posib*. Donetsk: LANDON-KHKHi [in Ukrainian].
7. *Sposib keruvannia povorotom transportnoho zasobu*. Patent No. 40814, Ukraine. MPK B60T1/00. No. u200813743; Filed 28.11.2008; Published 27.04.2009. Bulletin No. 8 [in Ukrainian].
8. *Sposib keruvannia povorotom transportnoho zasobu*. Patent No. 100077, Ukraine. MPK B60T1/00. No. u214414120; Filed 29.12.2014; Published 10.07.2015. Bulletin No. 3 [in Ukrainian].
9. *Systema povorotu vantazhnoho avtomobilia*. Patent No. 102955, Ukraine. MPK B62D11/08. No. u201505337; Filed 02.06.2015; Published 25.11.2015. Bulletin No. 22 [in Ukrainian].
10. *Systema upravlinnia kolesamy veduchoho mosta pry dynamichnomu sposobovi upravlinnia transportnym zasobom*. Patent No. 110465, Ukraine. MPK B62D11/09. No. u201603649; Filed 06.04.2016; Published 10.10.2016. Bulletin No. 19 [in Ukrainian].
11. *Systema pidvyshchennia manevrenosti vantazhnoho avtomobilia*. Patent No. 100699, Ukraine. MPK B60T13/26. No. u201560330; Filed 16.01.2015; Published 10.08.2015. Bulletin No. 15 [in Ukrainian].

Mykhailo Podryhalo, Prof., DSc., **Olexandr Polyanskyi**, Prof., DSc., **Yevgen Dubinin**, Prof., DSc., **Maxim Krasnokutsky**, **Vitaly Lytvyn**

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Rational Control of the Turning Dynamics of a Rear-Wheel Drive Vehicle with Motor Wheels

The study considers the issue of increasing the controllability of wheeled vehicles, proposes to increase the controllability of a rear-wheel drive vehicle with motor wheels when turning by eliminating the nonlinearity of the “zone of insensitivity” type. Proposed to use the calibrated system with two degrees of freedom, with the possibility of using both kinematic and dynamic turning methods. As a result, an equation is obtained that allows organizing the control of turning a rear-wheel drive vehicle with motor wheels in the absence of a nonlinearity of the “zone of insensitivity” type. To realize the specified turn, it is necessary to measure the vehicle mass, wheel rolling resistance coefficient, average angle of rotation of the guide wheels, position of the vehicle's center of mass, and torques on the rear drive wheels. The results obtained are important for improving the controllability of wheeled vehicles, ensuring the safety and reliability of their operation.

wheeled vehicle, controllability, zone of insensitivity, steering control

Одержано (Received) 28.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 18.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025

УДК 629.113

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.335-347](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.335-347)

В. П. Сахно¹, проф., д-р. техн. наук, М. М. Маяк², проф., д-р техн. наук,
В. П. Онищук², доц., канд. техн. наук, А. С. Котенко², С. В. Стельмашук²

¹Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

²Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

e-mail: sakhno@ntu.edu.ua, mayak@lutsk-ntu.com.ua, v.onyshchuk@lntu.edu.ua,

kotenko.a0015@lntu.edu.ua, stanislav0077@ukr.net

Вплив компоновальних і масових параметрів автомобіля і причепа на стійкість руху малотоннажного автопоїзда

Звичайне використання причепів із легковими автомобілями, пікапами, позашляховиками та фургонками зумовлене потребою у транспортуванні вантажів, зокрема негабаритних або спеціалізованих (як-от катери, човни, снігоходи тощо). Проте стійкість таких автопоїздів залежить від багатьох чинників і не завжди може бути гарантована, навіть якщо їхня конструкція вважається оптимальною. Проаналізовано вплив компоновальних і масових параметрів тягового автомобіля і причепа на критичну швидкість руху автопоїзда. Показано, що збільшення бази тягового автомобіля і його маси, зміщення центру мас уперед, за напрямком руху, як автомобіля тягача так і причепа, наближення точки зчіпки автопоїзда до центру мас тягового автомобіля збільшує критичну швидкість автопоїзда, у той час як збільшення бази причепа дещо зменшує цю швидкість. Проведене дослідження показало, що критична швидкість для конкретного автопоїзда становить лише 29,4 м/с, що значно нижче максимально можливої швидкості руху самого автомобіля. Це обґрунтовує необхідність детального аналізу впливу масових і компоновальних параметрів транспортних засобів на стійкість автопоїзда. Результати аналізу свідчать, що збільшення колісної бази та маси автомобіля-тягача, зміщення його центру мас уперед, а також зменшення відстані між центром мас тягача і точкою зчіпки покращують стійкість та підвищують критичну швидкість. Натомість довжина бази причепа і його дишла майже не впливають на цей показник. Отримані залежності описано за допомогою простих регресійних рівнянь, що можуть бути застосовані для розробки систем керування, спрямованих на підвищення стійкості малотоннажних автопоїздів.

автопоїзд, причіп, тяговий автомобіль, математична модель, компоновальні параметри, маса, стійкість, критична швидкість

Постановка проблеми. За останні кілька десятиліть було розроблено безліч систем управління для підвищення керованості та безпеки транспортних засобів, наприклад: антиблокувальна гальмівна система (ABS), електронна система контролю стійкості (ESC) система контролю тяги (TCS) тощо. Для підвищення безпеки однокілісних транспортних засобів (наприклад, легкових автомобілів) уряд США ще у 2012 році встановив стандарт FMVSS 126, який вимагає, щоб усі легкі автомобілі, що продаються у США, включили систему ESC [1]. Система ESC здатна створити момент ризику для підвищення бокової стійкості транспортних засобів без необхідності втручання водія. Результати моделювання, дані випробувань і статистика використання на дорогах показують, що стійкість транспортних засобів при виконанні різних маневрів з високими боковими прискореннями може бути покращена за допомогою системи ESC [1]. Однак більшість систем ESC призначені тільки для однокілісних транспортних засобів. Вони не враховують зовнішні навантаження, наприклад, від причепів, які є складовими автомобільного поїзда.

Причіп, з'єднаний з легковим автомобілем, пікапом, позашляховиком або фургоном, є звичайним явищем на дорогах більшості країн світу. Використання причепів, перш за все, пов'язано із необхідністю їхніх власників у постійних перевезеннях різних вантажів, у тому числі і негабаритних невеликої маси, або ж у перевезенні катерів,

човнів, квадроциклів, снігоходів та іншої техніки. Окремий вид причепів для легкових автомобілів складають житлові трейлери та спеціальні причепа, що використовуються для роздрібної торгівлі (комерційні причепа). Хоча ці причепа дозволяють перевозити більше вантажу і знижують витрату палива в порівнянні з односекційними транспортними засобами, вони можуть втратити бічну стійкість і створити серйозні проблеми при маневрах зміни смуг руху, подоланні криволінійних траєкторій тощо. Тому в конструкціях цих транспортних засобів акцент робиться на вирішенні компромісу між маневреністю та стійкістю руху, зокрема у роботі [2] були проведені дослідження з питань бокової стійкості автопоїздів, які пов'язані з робочими параметрами транспортних засобів і системними параметрами, наприклад, швидкістю руху, навантаженням на зчіпку, масою та моментом інерції причепа, положенням його осі (осей), жорсткістю шин тощо. Однак через різні умови експлуатації стійкість автопоїзда не може бути гарантована, навіть якщо автопоїзд представляє собою оптимальну конструкцію з фіксованими робочими параметрами транспортних засобів і параметрами системи, отже питання стійкості автопоїздів у процесі експлуатації потребує подальшого вирішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ряді експлуатаційних властивостей автотранспортних засобів (АТЗ) за тенденції збільшення швидкостей руху найважливішими показниками якості, що зберігається в будь-яких режимах, є стійкість і керованість [3]. Враховуючи той факт, що автопоїзд як АТЗ є засобом підвищеної небезпеки, при вирішенні задач щодо можливості експлуатації автопоїздів, слід одним із перших зробити кроки до теоретичних досліджень їхньої маневреності і стійкості руху, результати яких стануть основою для відповідей на багато питань технічного, організаційного, правового характеру [4]. Вибір конструктивних параметрів АТЗ, що забезпечують саме ці властивості, підвищує активну безпеку експлуатації і знижує вірогідність дорожньо-транспортних пригод (ДТП) на транспортних операціях. Стійкість і керованість АТЗ в сукупності повинні забезпечити упевненість водія в реалізації режиму руху, що задається, виключити мимовільне виникнення небезпечного відхилення від нього і зберегти можливість швидкого коригування з подальшою стабілізацією того ж режиму [5]. Одиночний або односекційний транспортний засіб, кваліфіковано керований у нормальних, неаварійних обставинах, здійснює цілком визначені, передбачені і контрольовані водієм, рухи. На відміну від цих транспортних засобів, для яких статична або динамічна нестійкість, що пов'язана з надлишковою поворотністю, є основною проблемою, шарнірно-з'єднані транспортні засоби також можуть мати динамічну або коливальну нестійкість, в основному через зниженого демпфування шарнірної системи на високих швидкостях руху [6]. Шарнірно-з'єднаний транспортний засіб характеризується унікальним динамічним явищем, відомим як зворотне прискорення (RWA), яке визначається як відношення максимального пікового бокового прискорення в центрі мас причепа до такого ж прискорення тягового автомобіля при виконанні маневру «зміна смуги руху» [7]. Шарнірне з'єднання (наприклад, зчіпка) і підвіска тягового автомобіля ізолюють водія від руху причепа, що може призвести до збільшення RWA при виконанні маневрів зміни смуги руху. Зазвичай причіп перевертається першим, і до того часу, коли водій розуміє, що відбувається, вже занадто запізно розпочинати коригуючу дію [8]. Коли автомобіль буксирує причіп, статична стійкість (тобто характеристики керованості в стійкому стані) може змінитися із недостатньої поворотності на надлишкову поворотність із-за додаткового навантаження на зчіпний пристрій. Таким чином, у конструкції контролера стійкості для комбінацій автомобіль-причіп критично важливим питанням, яке необхідно враховувати, є компроміс між статичною нестійкістю та динамічною нестійкістю. При цьому слід враховувати, що більшість

легких автомобілів мають пороги прокидання вище 1,0g, у той час як пороги перекидання легких вантажівок, фургонів і позашляховиків зменшуються до 0,8g.

У комбінації автомобіль-причіп кут зчіпки є відносним кутом ризикання між тяговим автомобілем і причепом. У літературі показано, що включення виміру вузла зчіпки для управління зворотним зв'язком коливань причепа може принести перевагу в плані безпеки у порівнянні зі звичайними алгоритмами зменшення коливань причепа, заснованими на швидкості ризикання автомобіля. У роботі [9] порівнюють три методи контролю стійкості для системи автомобіль-причіп, а саме активне гальмування причепа, активне рульове управління причепом і підхід зі змінною розміщення шарніра зчіпки автомобіль-причіп. Результати показують, що активне управління гальмуванням причепа має найкращу здатність гасити зовнішні збурення і підтримувати стабільну роботу комбінації автомобіль-причіп на високих швидкостях. У роботі [10] обґрунтовують переваги одночасного управління тягачем і причепом по відношенню до управління окремими ланками автопоїзда шляхом застосування пропорційно-інтегрально регулятора моменту ризикання транспортного засобу. Просте, але ефективне комерційне доступне рішення представлено системою АТС від AL-KO [11], яка забезпечує функцію екстреного гальмування причепа та активується автоматично, якщо автопоїзд відчуває проблеми зі стійкістю, тобто коли розкачування причепа досягає критичного рівня. Результати показують потенційно значущі активні переваги безпеки прямого управління кутом зчіпки по відношенню до стратегій, заснованих на швидкості ризикання автомобіля.

У роботі [5] були проведені дослідження щодо бічної стійкості шарнірно-з'єднаних транспортних засобів, пов'язаних з їхніми робочими параметрами і системними параметрами, наприклад, швидкістю руху, навантаженням на зчіпку, масою причепа, моментом інерції причепа, положенням осі, жорсткістю шин тощо [1, 6, 13]. Для підвищення поперечної стійкості шарнірно-з'єднаних транспортних засобів були розроблені три основні схеми системи управління:

1) диференціальне гальмування, активне рульове управління і активне управління кермом [1]. Для реалізації вищевказаних схем управління були розроблені та оцінені численні алгоритми управління. Очікується, що широкі дослідження взаємодії водія транспортних засобів і контролера надають цінні рекомендації по проектуванню систем управління стійкістю для комбінацій шарнірно-з'єднаних транспортних засобів.

У роботі [14] проблема асимптотичної стабілізації для прямолінійних і кругових рухів тягача з причепом вирішується за допомогою методів Ляпунова. Розроблені гладкі, лінійні і нелінійні закони управління, що забезпечують асимптотичну стійкість шарнірно-з'єднаних машин. Також вирішується проблема асимптотичної керованості з обмеженим управлінням на основі контролера, який повинен забезпечити рух ШЗМ за заданою траєкторією. Єдиною керуючою змінною у контролері є кут повороту передніх коліс тягача. Робота системи управління розглядається або у прямолінійному, або коловому русі ШЗМ із заданою швидкістю як під час руху вперед, так і під час руху назад. При цьому слід враховувати, що накладені обмеження на траєкторію руху ШЗМ не є занадто серйозним, оскільки будь-яка траєкторія може бути апроксимована послідовністю кругових та прямолінійних відрізків. Для кількісної оцінки стійкості в математичній теорії стійкості руху розроблено спеціальні методи. З цією метою також визначаються характеристики власних рухів АТЗ і зовнішніх збурень, граничні умови, що визначають можливість руху за умов перекидання, заносу тощо [5]. Тому оціночними параметрами стійкості зазвичай слугують критичні параметри (наприклад, швидкість руху), що визначають граничні умови переходу від стійкого руху до нестійкого, а також характеристики, що визначають реакції АТЗ після припинення дії зовнішніх збурень. У роботі [15] розглянуто відхилення від курсу причепа ШЗМ за низької швидкості, що піддається аналізу як за допомогою механічних моделей, так і

простих обчислень. Математична модель з одним ступенем свободи використовується для того, щоб показати, що існує швидкість, що входить в діапазон звичайного руху і не залежить від радіуса, при якій не буде відхилення причепа від курсу під час стійкого повороту. На більш високих швидкостях причіп буде слідувати за межами стійкого повороту, що було підтверджено під час маневру зміна смуги руху. У роботі [6] показано, що практично всі параметри автомобіля і причіпних ланок впливають на керованість і стійкість руху автопоїзда. Цей вплив пов'язаний з геометричними параметрами й положенням центра мас АТЗ, характеристиками шин [4], [5], [9], [17], [18], числом осей і розміщенням їх по базі [10], прийнятою схемою системи управління автопоїзда [18], що необхідно враховувати при дослідженні стійкості автопоїзда.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження впливу компоновальних і конструктивних параметрів тягового автомобіля і причепа на стійкість руху малотоннажного автопоїзда.

Для досягнення мети роботи сформульовані наступні завдання:

- доопрацювати математичну модель малотоннажного автопоїзда і визначити критичну швидкість автопоїзда;

- визначити можливість застосування регресійних моделей для дослідження впливу компоновальних і масових параметрів тягового автомобіля і причепа на стійкість руху автопоїзда;

- проаналізувати вплив компоновальних параметрів тягового автомобіля і причепа на критичну швидкість автопоїзда.

Виклад основного матеріалу. У роботі [19] розглянуто автопоїзд, рис.1, складається із двох модульних ланок, рис.1, які, в свою чергу, складаються із кінематично незалежних елементів – тягового автомобіля і причепа. За модульної побудови автопоїзда несуча система причепа спирається на свій візок, колеса якого неповоротні. У ведучої ланки передня вісь має керовані колеса, кути повороту яких θ_1 і θ'_1 , причому $\theta_1 > \theta'_1$. Колеса задньої осі тягового автомобіля - неповоротні, розташовані позаду його центра мас. У цій же роботі записані диференціальні рівняння плоскопаралельного руху автопоїзда:

- для поздовжньої швидкості центра мас тягового автомобіля

$$(m+m_1)(\dot{V}-U\omega)+c\omega^2m_1-[m_1d_1[(\dot{\omega}-\ddot{\varphi}_1)\sin\varphi_1-(\omega-\dot{\varphi}_1)^2\cos\varphi_1]=$$

$$=-(X_1\cos\theta_1+Y_1\sin\theta_1+X'_1\cos\theta'_1+Y'_1\sin\theta'_1)-(X_2+X'_2)-\sum_{j=1}^2[(X_{2j}+X'_{2j})\times\cos\varphi_1-(Y_{2j}+Y'_{2j})\sin\varphi_1];$$

- для поперечної швидкості центра мас тягового автомобіля

$$(m+m_1)(\dot{U}-V\omega)-c\omega^2m_1-[m_1d_1\times[(\dot{\omega}-\ddot{\varphi}_1)\cos\varphi_1+(\omega-\dot{\varphi}_1)^2\sin\varphi_1]=$$

$$=-(X_1\sin\theta_1-Y_1\cos\theta_1+X'_1\sin\theta'_1-Y'_1\cos\theta'_1)+(Y_2+Y'_2)-\sum_{j=1}^2(X_{2j}+X'_{2j})\times\sin\varphi_1+(Y_{2j}+Y'_{2j})\cos\varphi_1;$$

- для кутової швидкості тягового автомобіля

$$I\omega+[\dot{\omega}c-(U+V\omega)]cm_1+cm_1d_1\times[(\dot{\omega}-\ddot{\varphi}_1)\cos\varphi_1+(\omega-\dot{\varphi}_1)^2\sin\varphi_1]=$$

$$=H(X_1\cos\theta_1-Y_1\sin\theta_1+X'_1\cos\theta'_1-Y'_1\sin\theta'_1)+\varepsilon(X_1+X'_1)+a(Y_1\cos\theta_1-X_1\sin\theta_1+Y'_1\cos\theta'_1-X'_1\sin\theta'_1)$$

$$+(Y_2+Y'_2)b-c\sum_{j=1}^2[(X_{2j}+X'_{2j})\sin\varphi_1+(Y_{2j}+Y'_{2j})\times\cos\varphi_1];$$

- для причепа

$$[I_1 + m_1 d_1^2] \times (\dot{\omega} - \ddot{\phi}_1) + m_1 d_1 \times [\dot{V} - U\omega + c\omega^2] \times \sin \phi_1 + (V\omega - \dot{U} - c\omega^2) \times \cos \phi_1 = l_1 \sum_{j=1}^2 (Y_{2j} + Y'_{2j}) + M_1. \quad (4)$$

У системі рівнянь (1–4) прийняті такі позначення:

m, I – центр мас, маса і центральний момент інерції тягового автомобіля щодо вертикальної осі;

m_1, I_1 – те ж саме для причепа;

ϑ_1, ϑ_2 – курсові кути ланок автопоїзда;

ϕ_1 – кут складання кінематично незалежних ланок автопоїзда;

v, u – поздовжня і бокова проекції швидкості точки C , тобто проекції швидкості точки C на осі рухомої системи координат, безпосередньо пов'язаної з тяговим автомобілем;

ω – кутова швидкість тягового автомобіля;

v_1, u_1 – поздовжня і бокова проекції центру мас причепа осі рухомої системи координат, безпосередньо пов'язаної з причепом;

$M_k = f(\phi_1, \dot{\phi}_1)$ – момент опору повороту причепа;

X_i – поздовжні реакції опорної поверхні на колеса осей автопоїзда, $X_i = Z_i \times f$;

Z_i – нормальні реакції опорної поверхні на колеса осей автопоїзда;

f – коефіцієнт опору кочення;

Y_i – бокові реакції опорної поверхні на колеса осей автопоїзда, $Y_i = k_i \times \delta_i$;

k_i – коефіцієнт опору бічному відведенню коліс осей автопоїзда;

δ_i – кут бічного відведення коліс осей автопоїзда;

ε – довжина поворотної цапфи керованих коліс тягового автомобіля;

H – половина колії передньої осі тягового автомобіля;

$a=CA, b=CB, c=CO_K; d_l=O_1C_1, c_l=C_1O_2, l_l=d_l+c_l$ – геометричні параметри автопоїзда.

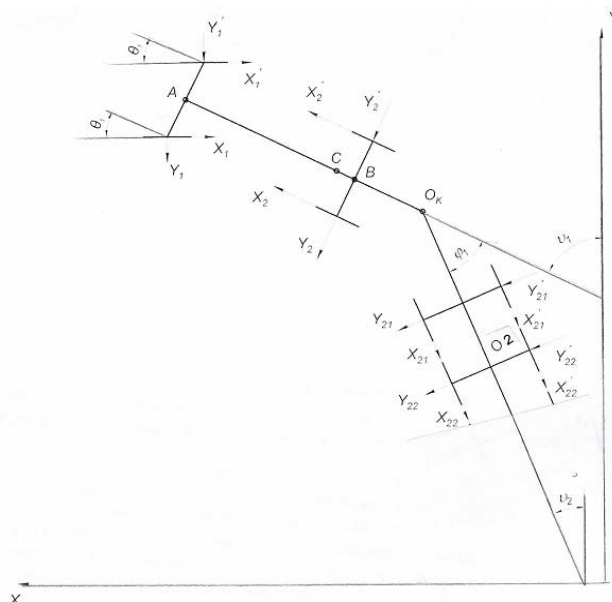


Рисунок 1 – Розрахункова схема автопоїзда на неусталеному повороті

Джерело: розроблено на підставі [19]

У системі рівнянь (1–4) прийняті такі позначення:

m, I – центр мас, маса і центральний момент інерції тягового автомобіля щодо вертикальної осі;

m_1, I_1 – те ж саме для причепа;

ϑ_1, ϑ_2 – курсові кути ланок автопоїзда;
 φ_1 – кут складання кінематично незалежних ланок автопоїзда;
 v, u – поздовжня і бокова проекції швидкості точки C , тобто проекції швидкості точки C на осі рухомої системи координат, безпосередньо пов'язаної з тяговим автомобілем;
 ω – кутова швидкість тягового автомобіля;
 v_1, u_1 – поздовжня і бокова проекції центру мас причепа осі рухомої системи координат, безпосередньо пов'язаної з причепом;
 $M_K = f(\varphi, \dot{\varphi}_1)$ – момент опору повороту причепа;
 X_i – поздовжні реакції опорної поверхні на колеса осей автопоїзда, $X_i = Z_i \times f$;
 Z_i – нормальні реакції опорної поверхні на колеса осей автопоїзда;
 f – коефіцієнт опору кочення;
 Y_i – бокові реакції опорної поверхні на колеса осей автопоїзда, $Y_i = k_i \times \delta_i$;
 k_i – коефіцієнт опору бічному відведенню коліс осей автопоїзда;
 δ_i – кут бічного відведення коліс осей автопоїзда;
 ε – довжина поворотної цапфи керованих коліс тягового автомобіля;
 H – половина колії передньої осі тягового автомобіля;
 $a=CA, b=CB, c=CO_K; d_l=O_1C_1, c_l=C_1O_2, l_l=d_l+c_l$ – геометричні параметри автопоїзда.

Аналітичні вирази для змінних $U(\theta), \omega(\theta), \varphi_1(\theta)$, що відповідають усталеним рухам ($\dot{U}=0, \dot{\omega}=0, \dot{\varphi}_1=0, \ddot{\varphi}_1=0$), можна отримати із системи рівнянь (1–4) при русі автопоїзда на коловій траєкторії досить великого радіуса за умови, що $V=\text{const}$ [20]:

$$\begin{cases} (m+m_1)\omega V = Y_1 + Y_2 + \sum_{j=1}^3 Y_{2j}; \\ -cm_1\omega V = aY_1 - b_1Y_2 - c \sum_{j=1}^3 Y_{2j} + M_1; \\ m_1d_1\omega V = l_1Y_2 + M_{12}. \end{cases} \quad (5)$$

За лінійності сил бічного відведення у функції кута відведення отримаємо:

$$Y_{ij} = k_{ij} \delta_{ij}, \quad (6)$$

У свою чергу, кути відведення коліс осей автопоїзда визначаються як

$$\delta_1 = \theta_1 - \frac{U+a\omega}{V}; \quad \delta_2 = -\frac{U}{V} + \frac{\omega}{V}b; \quad \delta_{2j} = -\frac{U}{V} + \frac{\omega}{V}(c+l_1+b_{2j}) - \varphi_1 \quad (j=1,2)$$

З урахуванням виразів, що визначають бічні сили і кути відведення осей автопоїзда, система рівнянь (1–4) записана у вигляді [20]:

$$\begin{cases} (m+m_1)\omega V = k_1\theta - \frac{U}{V}(k_1+k_2) - \frac{\omega}{V}[(k_1a-k_2b) - \sum_{j=1}^3 k_{2j}(c+l_1+b_{2j})] - \phi_1 c \sum_{j=1}^3 k_{2j}; \\ c(m+m_1)\omega V = -\frac{U}{V}(k_1a-k_2b - c \sum_{j=1}^3 k_{2j}) - \frac{\omega}{V}[k_1a^2+k_2b^2 + c \sum_{j=1}^3 k_{2j}(c+l_1+b_{2j})] + \phi_1 c \sum_{j=1}^3 k_{2j}; \\ m_1d_1\omega V = -\frac{U}{V}l_1 \sum_{j=1}^3 k_{2j} + \frac{\omega}{V}[l_1 \sum_{j=1}^3 k_{2j}(c+l_1+b_{2j})] - \phi_1 l_1 \sum_{j=1}^3 k_{2j}; \end{cases} \quad (7)$$

Сукупність функцій $u, \omega, \varphi_1 = (a_1, a_2, a_3) \exp(\lambda t)$ утворює часткове рішення системи (7), якщо і тільки якщо λ є коренем характеристичного рівняння

$$D(\lambda) = A_0\lambda^4 + A_1\lambda^3 + A_2\lambda^2 + A_3\lambda + A_4 = 0 \quad (8)$$

Матриця характеристичного рівняння (8)

$$\begin{vmatrix} a_{11}\lambda + b_{11} & a_{12}\lambda + b_{12} & a_{13}\lambda^2 + b_{13}\lambda + b_{14} \\ a_{21}\lambda + b_{21} & a_{22}\lambda + b_{22} & a_{23}\lambda^2 + b_{23}\lambda + b_{24} \\ a_{31}\lambda + b_{31} & a_{32}\lambda + b_{32} & a_{33}\lambda^2 + b_{33}\lambda + b_{34} \end{vmatrix} = \sum_{i=0}^{n=4} A_i \lambda^{n-i} = 0; \quad (9)$$

де $a_{11} = m + m_2$; $a_{12} = -m_2(B + C)$; $a_{13} = m_2C$; $b_{11} = \frac{A1}{v}$; $b_{12} = \frac{A2}{v} + (m + m_2)v$;

$b_{13}\lambda + b_{14} = A3 + \frac{\lambda}{v}A4$; $a_{21} = -m_2B$; $a_{22} = m_2(B^2 - 3BC) + In$; $a_{23} = -m_2BC$; $b_{21} = \frac{B1}{v}$;

$b_{22} = -vm_2(B + 2C) + \frac{B2}{v}$; $b_{23}\lambda + b_{24} = B3 + \frac{\lambda}{v}B4$ $a_{31} = m_2C$; $a_{32} = -In_2 - m_2(B + C)C$; $b_{31} = \frac{C1}{v}$;

$b_{32} = m_2vC - \frac{C2}{v}$; $a_{33} = In_2 + m_2C^2$; $b_{33}\lambda + b_{34} = C1 + \frac{\lambda}{v}C3$;

$A1 = 2(k_1 + k_2 + k_3 + k_4)$; $A2 = 2(k_1a - k_2b - k_3(B + C - c) - k_4(B + C + d))$;

$A3 = 2(k_3 + k_4)$; $A4 = 2(k_3c_{uu} + k_4(C + d))$;

$B1 = 2(k_1a - k_2b - k_3(c_{uu} + B) - k_4(L_2 + c_{uu} + B))$;

$B2 = 2(k_1a^2 + k_2b^2 + k_3(B + C - c)(B + c_{uu}) + k_4(B + C + d)(B + L_2 + c_{uu}))$.

За Раусом, необхідна, але недостатня умова стійкості полягає у тому, щоб усі коефіцієнти A_i були позитивні. Система буде стійкою, якщо визначник і його мінори позитивні. Аналіз коренів характеристичного рівняння може характеризувати стан системи. Визначники Гурвіца характеристичного рівняння (8) перший Δ_1 – відповідає за наявність позитивних дійсних коренів, а третій Δ_3 – за наявність позитивної дійсної частини уявних комплексно сполучених коренів.

Аналіз коефіцієнтів рівняння (8) показує, що критична швидкість автопоїзда залежить від масових і कंपонувальних параметрів, а також коефіцієнтів опору відведення коліс тягового автомобіля і причепа.

Запишемо у загальному вигляді рівняння, що визначає собою критичну швидкість

$$v_{kp} = f(m, m_1, a, L, c_0, c_{uu}, c, L_2, k_1, k_2, k_3, k_4) \quad (10)$$

У загальному випадку можливі наступні значення коренів характеристичного рівняння: λ є дійсна і позитивна величина – система нестійка, рух буде нестійким; λ – дійсна і від’ємна величина – система з часом повертається до стійкого положення. Якщо коефіцієнт λ являє собою комплексне число, то його позитивна дійсна частина свідчить про наявність наростаючих коливань, а негативна дійсна частина про наявність загасаючих коливань [20].

За формулою (9) можливо провести аналіз рівномірного прямолінійного руху, а саме, визначити величину критичної швидкості прямолінійного руху автопоїзда і виявити характер впливу різних факторів.

Вихідні дані для розв’язку рівняння (10) прийняті із роботи [19] і склали: $a=1,9$; $b=1,65$; $c=2,45$; $d_1=1,55$; $c_1=1,45$; $l_1=3,0$; $H=0,75$; $H=0,95$; $\varepsilon=0,2$; $V:=0$; $f:=0$; $X1=X2=X3=X4:=0$; $Z1=15958,2$; $Z2:=18376,8$; $Z3:=13720$; $Z4:=k3:=44700$; $g:=9.81$; $m1:=3500$; $m2:=2800$; $J1:=10972,5$; $J2:=6298,3$; $k1:=44700$; $k2:=44700$; $k3:=44700$; $k4:=44700$; $\phi_{i0}=0$; $\theta_{i0}=0,0$; $I_y=1987,5$; $I_{y1}=278,5$.

Як приклад, у табл. 2 наведені значення коренів характеристичного рівняння, за якими можна визначити вид стійкості, або нестійкості автопоїзда.

Таблиця 2 - Корені характеристичного рівняння

v_a , м/с	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
25	-17.415752	-8.197634691	-0.4544278511-2.578463350*I	-0.4544278511+2.578463350*I
27	-13.832345	-7.465466342	-0.07216824934-3.01720161*I	-0.0721682497+3.01720112*I
29	-11.658712	-6.795897432	-0.0263740487-3.077087466*I	-0.026374048+3.077087466*I
30	-11.214587	-6.124717952	0.0548309854-3.108271945*I	0.0548309854+3.108271945*I

Джерело: розроблено авторами

Як випливає з табл.2, до швидкості 31 м/с корені характеристичного рівняння мають дійсну від'ємну частину, і стійкість системи забезпечується. При перевищенні швидкості більше 29 м/с колювання параметрів руху будуть розбіжними, що призведе до втрати стійкості і неможливості подальшого руху. Для більш точного визначення критичної швидкості руху діапазон швидкостей 29...30 м/с був розділений ще на 3 піддіапазони: 29,2; 29,3; 29,4; 29,5; 29,6 м/с. У цих піддіапазонах знаходилися корені характеристичного рівняння. Перший додатний корінь з'явився за швидкості 29,4 м/с, тобто критичною є швидкість 29,4 м/с.

Дослідимо фактори, що впливають на критичну швидкість і стійкість руху автопоїзда. У роботі [21] запропоновано оцінювати вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на маневреність і стійкість руху автопоїзда за відносними параметрами на основі апроксимації отриманих аналітичних залежностей щодо маневреності та стійкості руху автопоїзда. Функція апроксимації має вигляд

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2, \quad (11)$$

де Y – експлуатаційний показник (критична швидкість, габаритна смуга руху, завантаженість шин осей причепа бічними силами тощо);

x – геометричний параметр, вплив якого визначається (положення центра мас ланки, база ланки, довжина дишла та ін.);

a_i – емпіричні коефіцієнти.

Результати апроксимації впливу положення центру мас тягача a' та причепа c' на $v_{кр}$ автопоїзда описано наступними рівняннями [12]

$$v_{кр} = 33,35252 - 13,85904 a' + 6,81448 (a')^2, \quad (12)$$

$$v_{кр} = 33,46535 - 13,71481 c' + 6,25438 (c')^2, \quad (13)$$

де $a' = \frac{a}{L}$ і $c' = \frac{c}{L}$ – відносні значення параметрів щодо розташування центру мас тягового автомобіля і точки зчіпки його з причепом.

На рис. 2 наведена залежність зміни критичної швидкості руху автопоїзда від відносних параметрів координати центру мас a і розташування точки зчіпки c .

За номінальних значень цих параметрів $a' = 0,517$ і $c' = 0,482$ критична швидкість руху автопоїзда відповідно склала 28,16 м/с і 28,25 м/с. При цьому похибка у визначенні критичної швидкості за виразами (8) і (11), (12) не перевищила 4,5 %, тобто рівняння апроксимації можна використовувати для дослідження впливу конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху автопоїзда.

У роботі [21] за відносними параметрами визначалася не тільки критична швидкість руху автопоїзда, а його і габаритна смуга руху і кути відведення коліс осі причепа, що впливають на показники цих властивостей. Отримані залежності представлені у вигляді:

$$a' = \frac{a}{L} = 0,40 \dots 0,7; L' = \frac{L}{D} = 0,60 \dots 0,82; c_0' = \frac{c_0}{L} = 0,30 \dots 0,55; c' = \frac{c}{L_2} = 0,2 \dots 0,5;$$

$$L_2' = \frac{L_2}{D_2} = 0,2 \dots 0,45;$$

$$c_{ш}' = \frac{c_{ш}}{D_2} = 0,2 \dots 0,5; m' = \frac{m}{m + m_2} = 0,339 \dots 1,085; m_2' = \frac{m_2}{m + m_2} = 0,339 \dots 0,746;$$

$$k_1' = \frac{k_1}{k_0} = 0,6 \dots 1,2; k_2' = \frac{k_2}{k_0} = 0,7 \dots 1,5; k_3' = \frac{k_3}{k_0} = 0,9 \dots 1,8; k_4' = \frac{k_4}{k_0} = 0,9 \dots 1,8,$$

де a – координата центру мас тягового автомобіля;

L, L_2, D, D_2 – база і довжина тягового автомобіля і причепа;

c_0 – відстань від центру мас тягового автомобіля до точки зчипки з причепом;

c – відстань від центру мас причепа до точки зчипки з автомобілем;

$c_{ш}$ – довжина дишла причепа;

m, m_2 – маса автомобіля і причепа;

k_0 – коефіцієнт опору відведення за номінального тиску повітря в шинах і навантаження на колесо;

k_i – коефіцієнт опору відведення коліс осей автомобіля і причепа.

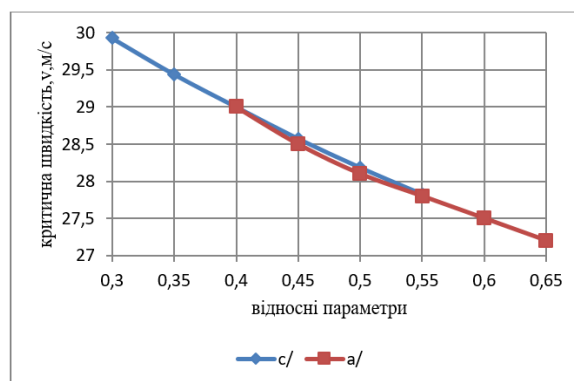


Рисунок 2 – Залежність критичної швидкості руху автопоїзда від розташування центру мас тягового автомобіля (a') і точки зчипки з причепом (c')

Джерело: розроблено авторами

У табл. 2 наведені коефіцієнти апроксимуючого рівняння для оцінки впливу відносних компоновальних, масових і жорсткісних характеристик шин тягового автомобіля і причепа, за якими визначалася критична швидкість і габаритна смуга руху автопоїзда.

Таблиця 2 – Коефіцієнти апроксимуючого полінома для визначення впливу компоновальних і масових параметрів автопоїзда на маневреність і стійкість руху

Коефіцієнти апроксимуючого рівняння	Відносні компоновальні і масові параметри автомобіля і причепа						
	a'	c'	L'	L_2'	c_0'	m_2'	m_1'
a_0	0,1981	0,31238	0,44762	0,47328	0,57524	0,6819	0,79619
a_1	30,8910	29,6281	28,589	28,1831	27,6236	27,029	26,6582
a_2	0,04762	0,1881	0,34048	0,41243	0,49048	0,65952	0,81667

Джерело: розроблено авторами

Результати розрахунку впливу компоновальних параметрів автопоїзда наведені на рис. 3.

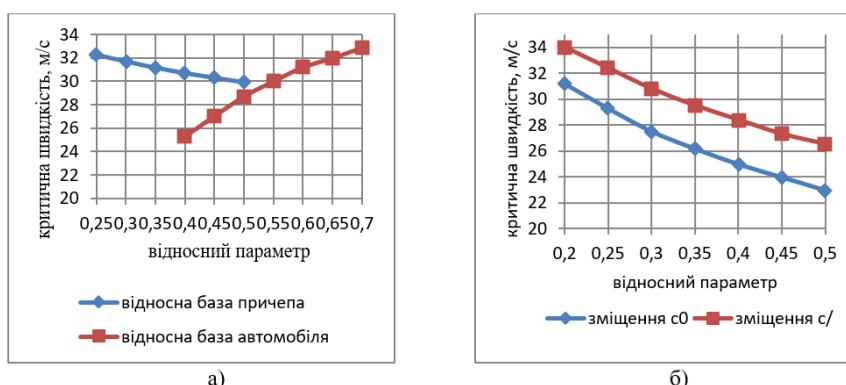


Рисунок 3 – Залежність критичної швидкості руху автопоїзда від відносної бази автомобіля і причепа (а) і відносного зміщення точки зчіпки (б)

Джерело: розроблено авторами

Аналіз графіків залежності критичної швидкості автопоїзда від компоновальних параметрів тягового автомобіля і причепа дозволяє зробити наступні висновки:

- збільшення бази тягового автомобіля збільшує критичну швидкість автопоїзда, у той час як збільшення бази причепа дещо зменшує цю швидкість;
- зміщення центру мас уперед, за напрямком руху, як автомобіля тягача так і причепа, наближення точки зчіпки автопоїзда до центру мас тягового автомобіля збільшує критичну швидкість руху автопоїзда.

За розміщення точки зчіпки на тяговому автомобілі і розташування центру мас причепа передбаченого їх конструкцією, з'ясовано, що база причепа та довжина його дишла практично не впливають на критичну швидкість руху автопоїзда.

У подальшому було проаналізовано вплив маси тягового автомобіля і причепа на критичну швидкість руху автопоїзда.

На рис. 4 наведена залежність критичної швидкості автопоїзда від відносної маси тягового автомобіля і причепа.

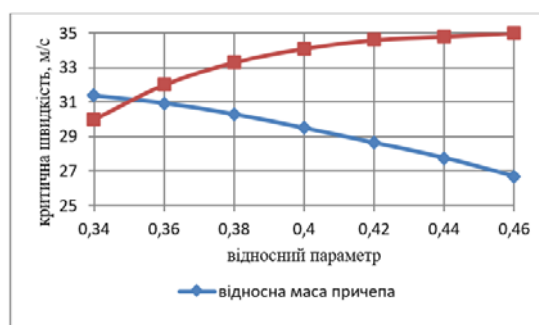


Рисунок 4 – Залежність критичної швидкості руху автопоїзда від відносної маси автомобіля і причепа
Джерело: розроблено авторами

Як випливає з рис. 4, до збільшення критичної швидкості руху призводить збільшення маси тягового автомобіля, у той час як збільшення маси причепа призводить до зменшення цієї швидкості. Із цього слідує важливий практичний висновок: при завантаженні автопоїзда спочатку завантажувати тяговий автомобіль до дозволеної максимальної його маси, а потім уже і причіп.

Обговорення результатів. Причіп, з'єднаний з легковим автомобілем, пікапом, позашляховиком або фургоном, є звичайним явищем на дорогах більшості країн світу. Використання причепів, перш за все, пов'язано із необхідністю їхніх власників у

постійних перевезеннях різних вантажів, у тому числі і негабаритних невеликої маси, або ж у перевезенні катерів, човнів, квадроциклів, снігоходів та іншої техніки. При цьому слід враховувати, що через різні умови експлуатації стійкість автопоїзда не може бути гарантована, навіть якщо автопоїзд представляє собою оптимальну конструкцію з фіксованими робочими параметрами транспортних засобів і параметрами системи, отже питання стійкості автопоїздів у процесі експлуатації потребує подальшого вирішення.

Коли автомобіль буксирує причіп, статична стійкість (тобто характеристики керованості в стійкому стані) може змінитися із недостатньої повороткості на надлишкову повороткість із-за додаткового навантаження на зчіпний пристрій. При цьому слід враховувати, що більшість легких автомобілів мають пороги прокидання вище 1,0g, у той час як пороги перекидання легких вантажівок, фургонів і позашляховиків зменшуються до 0,8g, а автопоїздів і того менше. Пояснюється це тим, що практично усі параметри автомобіля і причіпних ланок впливають на керованість і стійкість руху автопоїзда. Цей вплив пов'язаний з геометричними параметрами й положенням центра мас ланок автопоїзда, характеристиками шин, числом осей і розміщенням їх по базі, прийнятою схемою системи управління автопоїзда, що вимагає подальших досліджень.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що для автопоїзда, який розглядається, критична швидкість склала 29,4 м/с, що значно менше максимальної швидкості руху тягового автомобіля. Тому актуальним стало дослідження впливу компоновальних і масових параметрів тягового автомобіля і причепа на стійкість руху автопоїзда. У результаті такого дослідження показано, що збільшення бази тягового автомобіля і його маси, зміщення центру мас уперед, за напрямком руху як автомобіля тягача, так і причепа, наближення точки зчіпки автопоїзда до центру мас тягового автомобіля збільшує критичну швидкість автопоїзда, у той час як збільшення бази причепа дещо зменшує цю швидкість. При цьому база причепа та довжина його дишла практично не впливають на критичну швидкість руху автопоїзда. Ці результати були отримані з використання простих регресійних рівнянь, які можна використати при розробці контролерів для підвищення стійкості малотоннажних автопоїздів.

Висновки. Удосконалено математичну модель, що описує плоскопаралельний рух автопоїзда з причепом категорії O2, за допомогою якої визначена критична швидкість руху, яка склала 29,4 м/с. Доведено можливість застосування регресійних моделей для дослідження впливу компоновальних і масових параметрів тягового автомобіля і причепа на стійкість руху автопоїзда. Проаналізовано вплив компоновальних і масових параметрів тягового автомобіля і причепа на критичну швидкість руху автопоїзда. Показано, що збільшення бази тягового автомобіля і його маси, зміщення центру мас уперед, за напрямком руху, як автомобіля тягача так і причепа, наближення точки зчіпки автопоїзда до центру мас тягового автомобіля збільшує критичну швидкість автопоїзда, у той час як збільшення бази причепа дещо зменшує цю швидкість. При цьому база причепа та довжина його дишла практично не впливають на критичну швидкість руху автопоїзда.

Із цього слідує важливий практичний висновок: за обраної конструкції автопоїзда при його експлуатації спочатку завантажувати тяговий автомобіль до дозволеної максимальної його маси, а потім уже і причіп.

Список літератури

1. Vempaty S., Zhao L., He Y. An Overview of Control Schemes for Improving the Lateral Stability of Car-Trailer Combinations. *International Journal of Vehicle Performance*. January 2020. 45 с. DOI: 10.1504/IJVP.2020.10028995.
2. He Y., Islam M.M. An automated design method for active trailer steering systems of articulated heavy vehicles. *ASME Journal of Mechanical Design*. 2012. Vol. 134/041002. С. 1–15.

3. Вербицький В. Г., Сахно В. П., Кравченко А. П., Костенко А. В., Даниленко А. Е. Автомобілі. Стійкість. Луганськ: Ноулідж, 2013.
4. Сахно В. П., Стельмашук В. В., Пазін Р. В. Визначення параметрів стійкості автопоїзда з причепом категорії O2. *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Seria: Transport. Rzeszow*, 2018. № 15. С. 93–102.
5. Стельмашук В. В., Пазін Р. В. До питання комплектації автопоїзда з причепом категорії O2. *Вісник Машинобудування та транспорту*. 2016. № 2. С. 97–105.
6. Сахно В. П., Кузнецов Р. М., Стельмашук В. В., Козачук Л. С. До визначення показників стійкості автопоїзда категорії M1 у перехідних режимах руху. *Сучасні технології в машинобудуванні і транспорті*. Луцьк: Луцький НТУ, 2014. № 2. С. 123–128.
7. Islam M., He Y. A parallel design optimisation method for articulated heavy vehicles with active safety systems. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2013. Vol. 20. С. 327–341.
8. De Bernardis M., Rini G., Bottiglione F., Hartavi A. E., Sorniotti A. On nonlinear model predictive direct yaw moment control for trailer sway mitigation. *Vehicle System Dynamics*. 2023. Vol. 61, № 2. С. 445–471. DOI: 10.1080/00423114.2022.2054352.
9. Shamim R., Islam M., He Y. A comparative study of active control strategies for improving lateral stability of car-trailer systems. *SAE Technical Paper*, 2011-01-0959, 2011.
10. Wang W., Fan J., Xiong R., та ін. Lateral stability control of four wheels independently drive articulated electric vehicle. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, 2016.
11. AL-KO. Comprehensive catalogue trailer components. Part No. 499 699 B. Edition 06/2021.
12. Сахно В. П., Поляков В. М., Шарай С. М., Човча І. С. Вплив положення центра мас причепа категорії O1 на стійкість руху автопоїзда. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. № 2(14). С. 111–120. DOI: 10.31649/2413-4503-2021-14-2-111-120.
13. Deng W., Kang X. Parametric study on vehicle-trailer dynamics for stability control. *SAE Technical Paper* 2003-01-1321, 2003.
14. Astolfi A., Bolzem P., Locatelli A. Path-tracking of a tractor-trailer vehicle along rectilinear and circular paths: A Lyapunov-based approach. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2004. Vol. 20, № 1. С. 154–160.
15. Galluppi O., Formentin S., Novara C., Savaresi S. M. Nonlinear stability control of autonomous vehicles: a MIMO D2-IBC solution. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 50, Issue 1. С. 3691–3696.
16. Козачук Л. С. До визначення стійкості руху автопоїзда категорії M1. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2014. Вип. 2(69). С. 121–128.
17. Сахно В. П., Зав'ялова Л. І., Нестеренко М. П., Лагошна О. О. Дослідження впливу кількості некерованих колісних осей на область стійкості прямолінійного руху багатовісного автомобіля. *Вісник Національного транспортного університету*. 2007. Вип. 14. С. 164–169.
18. Сахно В. П., Зав'ялова Л. І., Нестеренко М. П., Лагошна О. О. Шляхи підвищення стійкості руху багатовісного автомобіля. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2006. № 7(101). С. 91–94.
19. Сахно В. П., Стельмашук В. В., Пазін Р. В. Маневреність автопоїзда з причепом категорії O2. *Вісник Національного транспортного університету. Серія: Технічні науки*. 2018. Вип. 3(42). С. 113–126.
20. Сахно В. П., Поляков В. М., Шарай С. М., Мурований І. С., Омельницький Є. О. Шарнірно-зчленовані автобуси. Маневреність та стійкість: монографія. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2021. 288 с.
21. Тімков О. М. Визначення показників маневреності причіпного автопоїзда з наближеними осями причепа. *Вісник НТУ*. 2003. № 8. С. 325–327.

References

1. Vempaty, S., Zhao, L., & He, Y. (2020). An overview of control schemes for improving the lateral stability of car-trailer combinations. *International Journal of Vehicle Performance*, January, 45 p. DOI:10.1504/IJVP.2020.10028995.
2. He, Y., & Islam, M.M. (2012). An automated design method for active trailer steering systems of articulated heavy vehicles. *ASME Journal of Mechanical Design*, 134(041002), 1–15.
3. Verbytskyi, V.H., Sakhno, V.P., Kravchenko, A.P., Kostenko, A.V., & Danylenko, A.E. (2013). *Avtomobili. Stiikist'*. Luhansk: Noulidzh [in Ukrainian].
4. Sakhno, V.P., Stelmaschuk, V.V., & Pazin, R.V. (2018). Vyznachennia parametriv stiikosti avtovoza z prytsepom katehorii O2. *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Seria: Transport*, 15, 93–102 [in Ukrainian].
5. Stelmaschuk, V.V., & Pazin, R.V. (2016). Do pytannia komplektatsii avtovoza z prytsepom katehorii O2. *Visnyk Mashynobuduvannia ta Transportu*, 2, 97–105 [in Ukrainian].
6. Sakhno, V.P., Kuznetsov, R.M., Stelmaschuk, V.V., & Kozachuk, L.S. (2014). Do vyznachennia pokaznykiv stiikosti avtovoza katehorii M1 u perekhidnykh rezhymakh rukhu. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni i transporti*, 2, 123–128. Lutsk: Lutsk NTU [in Ukrainian].
7. Islam, M., & He, Y. (2013). A parallel design optimisation method for articulated heavy vehicles with active safety systems. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 20, 327–341.

8. De Bernardis, M., Rini, G., Bottiglione, F., Hartavi, A.E., & Sornioti, A. (2023). On nonlinear model predictive direct yaw moment control for trailer sway mitigation. *Vehicle System Dynamics*, 61(2), 445–471. DOI:10.1080/00423114.2022.2054352.
9. Shamim, R., Islam, M., & He, Y. (2011). A comparative study of active control strategies for improving lateral stability of car-trailer systems. *SAE Technical Paper*, 2011-01-0959.
10. Wang, W., Fan, J., Xiong, R., et al. (2016). Lateral stability control of four wheels independently drive articulated electric vehicle. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*.
11. AL-KO. (2021). *Comprehensive catalogue trailer components*. Part No. 499 699 B, Edition 06/2021.
12. Sakhno, V.P., Polyakov, V.M., Sharai, S.M., & Chovcha, I.S. (2021). Vplyv polozhennia tsentra mas prytsepa katehorii O1 na stiikist' rukhu avtovoza. *Visnyk Mashynobuduvannia ta Transportu*, 2(14), 111–120. DOI:10.31649/2413-4503-2021-14-2-111-120 [in Ukrainian].
13. Deng, W., & Kang, X. (2003). Parametric study on vehicle-trailer dynamics for stability control. *SAE Technical Paper*, 2003-01-1321.
14. Astolfi, A., Bolzern, P., & Locatelli, A. (2004). Path-tracking of a tractor-trailer vehicle along rectilinear and circular paths: A Lyapunov-based approach. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(1), 154–160.
15. Galluppi, O., Formentin, S., Novara, C., & Savaresi, S.M. (2017). Nonlinear stability control of autonomous vehicles: a MIMO D2-IBC solution. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 3691–3696.
16. Kozachuk, L.S. (2014). Do vyznachennia stiikosti rukhu avtovoza katehorii M1. *Visnyk Zhytomyrs'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, 2(69), 121–128 [in Ukrainian].
17. Sakhno, V.P., Zaviailova, L.I., Nesterenko, M.P., & Lahoshna, O.O. (2007). Doslidzhennia vplyvu kil'kosti nekerovanykh kolisnykh osei na oblast' stiikosti priamoliniino rukhu bahatovisnoho avtomobilia. *Visnyk Natsional'noho Transportnoho Universytetu*, 14, 164–169 [in Ukrainian].
18. Sakhno, V.P., Zaviailova, L.I., Nesterenko, M.P., & Lahoshna, O.O. (2006). Shliakhy pidvyshchennia stiikosti rukhu bahatovisnoho avtomobilia. *Visnyk Skhidnoukrains'koho natsional'noho universytetu imeni V. Dalia*, 7(101), 91–94 [in Ukrainian].
19. Sakhno, V.P., Stelmashchuk, V.V., & Pazin, R.V. (2018). Manevrenist' avtovoza z prytsepom katehorii O2. *Visnyk Natsional'noho Transportnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, 3(42), 113–126 [in Ukrainian].
20. Sakhno, V.P., Polyakov, V.M., Sharai, S.M., Murovanyi, I.S., & Omelnytskyi, Ye.O. (2021). *Sharniurno-zhelenovani avtobusy. Manevrenist' ta stiikist': Monohrafiia*. Lutsk: IVV Lutsk NTU. 288 p. [in Ukrainian].
21. Timkov, O.M. (2003). Vyznachennia pokaznykiv manevrenosti prytsepnogo avtovoza z nablyzhenymy osiami prytsepa. *Visnyk NTU*, 8, 325–327 [in Ukrainian].

Volodymyr Sakhno¹, Prof., DSc., **Mykola Mayak**², Prof., DSc., **Vasyl Onyshchuk**², Assoc.Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kotenko**², **Stanislav Stelmashchuk**²

¹National University of Transport, Kyiv, Ukraine

²Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Influence of Layout and Mass Parameters of a Vehicle and Trailer on The Stability of a Light-Duty Road Train

The use of trailers with passenger cars, pickups, SUVs, and vans is commonly driven by the need to transport cargo, particularly oversized or specialized items (such as boats, watercraft, snowmobiles, etc.). However, the stability of such vehicle-trailer combinations depends on multiple factors and cannot always be guaranteed, even when the design is considered optimal.

This study analyzes the influence of layout and mass parameters of the towing vehicle and trailer on the critical speed of a light-duty road train. It is shown that increasing the wheelbase and mass of the towing vehicle, as well as shifting the center of gravity of both the tractor and trailer forward in the direction of motion, and reducing the distance between the center of gravity of the tractor and the hitch point of the road train, lead to an increase in the critical speed. In contrast, increasing the trailer wheelbase slightly decreases this speed.

The conducted analysis revealed that the critical speed for the studied road train configuration is only 29.4 m/s, which is significantly lower than the maximum possible speed of the towing vehicle alone. This highlights the necessity of a detailed study on how the mass and layout parameters of the vehicles affect the stability of the road train.

The results demonstrate that increasing the towing vehicle's wheelbase and mass, shifting its center of gravity forward, and reducing the distance to the hitch point improve the system's stability and increase the critical speed. Conversely, the trailer's base length and drawbar have minimal effect. The relationships obtained were described using simple regression equations, which can be applied in the design of control systems aimed at improving the stability of light-duty road trains.

road train, trailer, towing vehicle, mathematical model, layout parameters, mass, stability, critical speed

Одержано (Received) 07.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 09.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

УДК 629.33:658.56

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.348-363](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.348-363)

А. А. Сергійчук, В. В. Аулін, проф., д-р техн. наук.,

А. В. Гриньків, ст. дослідник, канд. техн. наук, А. В. Сергійчук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна**e-mail: AulinVV@gmail.com*

Забезпечення належного рівня якості надання послуг підприємствами технічного сервісу колісних транспортних засобів проведенням їх акредитації

В статті розглянуто проблему забезпечення належного рівня якості надання послуг підприємствами технічного сервісу колісних транспортних засобів проведенням їх акредитації через створення в випробувальній лабораторії. Проаналізовано основні напрямки підвищення якості технічного сервісу колісних транспортних засобів з впровадженням Стандартів ISO 9001:2015, ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Зазначено, що система управління якістю транспортних послуг на підприємстві повинна враховувати їх специфіку. Визначено етапи формування системи управління якістю без впровадження і з впровадженням випробувальної лабораторії перевірки конструкції та технічного стану колісних транспортних засобів.

Показано, що напрямки забезпечення належного рівня якості надання послуг підприємством ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСТИКА" сформовані з використанням концепції Total Quality Management – комплексного управління якістю на підприємстві. Розроблено п'ять етапів впровадження ДСТУ ISO/IEC 17085:2019 у діяльність підприємства станції технічного обслуговування ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСТИКА". Зазначимо, що на завершальному етапі впровадження СТАНДАРТУ передбачається зовнішній аудит Національним агентством з акредитації України. За результатом перевірки підприємства технічного сервісу видано сертифікат відповідності міжнародного стандарту ISO/IEC 17025:2019. Для засвідчення позитивного проходження акредитації надається право створення випробувальної лабораторії конструкції та технічного стану колісних транспортних засобів.

Визначено зміни в структурі підприємства та наведена організаційна структура випробувальної лабораторії на ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСТИКА" м. Кропивницький та зазначено її основні дільниці. Сформульовано мету, основні завдання, обов'язкові настанови надання послуг випробувальною лабораторією. Сформульовано вимоги до отриманої інформації щодо випробування колісних транспортних засобів, її конфіденційності.

Визначені можливості, якими наділена випробувальна лабораторія, її функціонування та об'єктів дослідження. Згідно ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 показано які дослідження колісних транспортних засобів проводить випробувальна лабораторія: категорії транспортних засобів, причепів та напівпричепів, обладнання. Зазначено типи перевірок і рівнів процесів в вузлах, системах і агрегатах колісних транспортних засобів. Показано які методи і методики та обладнання використовує випробувальна лабораторія у своїй діяльності. Визначено вимоги до складання звітів (протоколів) по випробуванням та яку інформацію має містити протокол випробування.

якість, колісний транспортний засіб, підприємств, технічний сервіс, стандарт, акредитація, випробувальна лабораторія

Постановка проблеми. З початком повномасштабного нападу російської федерації на Україну, функціонування галузі автомобільного транспорту (АТ) автотранспортних підприємств (АТП), підприємств технічного сервісу (ПТС) постало перед небувалими викликами. Зокрема, станції технічного обслуговування (СТО) змушені працювати в умовах нестабільного постачання запчастин, нестачі кваліфікованого персоналу, постійними проблемами із постачання електроенергії та зростання експлуатаційного навантаження на АТ [1-4].

В той час, наявні труднощі зумовили необхідність переосмислення внутрішніх процесів обслуговування колісних транспортних засобів (КТЗ) із урахуванням обмежених ресурсів і підвищених вимог з боку споживачів. У цих обставинах зростає

інтерес до системного підходу, зокрема – до впровадження стандартів якості, які дозволяють забезпечити передбачуваний результат та мінімізувати помилки транспортного обслуговування [5-9].

Враховуючи той факт, що більшість українських СТО функціонують без впроваджених систем управління якістю, то це призводить до відсутності єдиного підходу до процесів обслуговування КТЗ, низької прогнозованості якості послуг, зниження довіри клієнтів у кризових умовах [10,11].

Отримані результати соціологічного опитування [12] серед відвідувачів СТО у Київській, Дніпропетровській, Львівській та Кіровоградській областях виявили основні проблемні аспекти обслуговування:

- затримки у виконанні операцій по технічному сервісу КТЗ;
- діагностичні помилки визначення технічного стану КТЗ;
- розбіжності між заявленою і реальною вартістю виконання операцій технічного сервісу;
- фактична якість послуг КТЗ.

Аналізуючи існуючі результати, можна бачити, що якість обслуговування клієнтів є вагомо нижчою без впровадження стандартів ISO 9001:2015, ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 [6,13,14].

Саме тому, система управління якістю, яка побудована згідно з вимогами ISO 9001:2015, дозволяє створити системно впорядковану модель взаємодії всередині СТО - від моменту прийому замовлення до остаточної передачі КТЗ після виконання робіт. Завдяки застосуванню принципів процесного підходу та управління ризиками, СТО можуть зменшити кількість технічних помилок, покращити планування системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р), забезпечити постійне якісне обслуговування та підвищити довіру клієнтів, що є особливо важливим компонентом в умовах воєнного та післявоєнного періодів [7, 15-17].

Окрім того, стандарт ISO 9001:2015 акцентує увагу на клієнто-орієнтованість, чіткому документуванні процедур, систему постійного вдосконалення, управлінню ризиками та кваліфікаційну підтримку персоналу. Безперечно, ці аспекти стають особливо цінними в умовах нестабільності, коли гнучкість має йти поряд з контролем [15,18].

Шляхи вирішення цих питань підтверджують, що наявність сертифікованої системи управління якістю позитивно впливає на задоволеність клієнтів та знижує ризик повторного обслуговування (рекламації) одного й того ж КТЗ через низьку якість наданих послуг з ТО і Р [19].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час здійснюються розробки в галузі методології та технології управління якістю в промисловості та в сфері обслуговування [6,10,17,19], об'єктом застосування цих результатів стали передові підприємства [20]. На першому етапі формування системи управління якістю необхідно створити нормативний, науково-методичний доробок та інфраструктуру для ефективного виконання програм у галузі управління якістю [21].

Якість діяльності підприємств визначає їх конкурентоспроможність. Для визнання послуг (продукції) підприємств необхідно, щоб вони відповідали міжнародним стандартам ISO 9000:2000, тобто, були методичною основою впровадження ефективної системи управління якістю повинні бути вимоги до ISO 9000:2000 [22]. Основою застосування міжнародних та вітчизняних стандартів є процесний підхід до опису діяльності підприємств [23-26].

При впровадженні системи управління якістю транспортних послуг необхідно враховувати специфіку підприємств [27-30]:

- чітко визначити, які послуги надає підприємство;
- які параметри якості кожного виду послуги;
- з'ясувати, хто є споживачем послуги;
- необхідно враховувати роль співробітника в технологічному процесі надання послуг, принципи та методи їх залучення до процесу впровадження системи управління якістю надання послуг, а також їх навчання та мотивацію у галузі управління якістю;
- система управління якістю має бути складовою державних вимог діяльності підприємств (система акредитації);
- при впровадженні системи управління якістю необхідно враховувати специфіку всієї сукупності процесів і явищ, що відбуваються в підприємстві;
- система управління якістю повинна враховувати зміни в навколишньому світі та адаптуватися до них;
- у зв'язку з розвитком науково-технічного прогресу необхідно передбачати актуалізацію вимог щодо надання послуг;

Розробка системи управління якістю може мати кілька етапів [10,31-33]:

- зміна організаційної структури управління, а саме формування спеціалізованого підрозділу у галузі управління якістю (випробувальна лабораторія);
- проведення самооцінки підготовленості персоналу підприємства до впровадження системи управління якістю з метою виявлення сильних та слабких сторін;
- встановлення потреб і очікувань споживачів і інших зацікавлених осіб;
- розробка політики і цілей підприємства в області якості;
- визначення карти процесів і розподіл відповідальності, необхідних для досягнення цілей у сфері якості;
- розробка стандартів, що дозволяє чітко і ясно описати кожен процес діяльності підприємства;
- визначення необхідних ресурсів і забезпечення ними підприємства для досягнення цілей у сфері якості;
- розробка і застосування методів вимірювання результативності і ефективності кожного процесу;
- розробка коригувальних заходів у випадку виявлення невідповідностей;
- розробка і застосування процесу постійного покращення системи управління якістю.

Природним підтвердженням якісного рівня діяльності підприємства є сертифікат відповідності системи управління якістю підприємства міжнародним стандартам серії ISO 9000:2000. Наявність програмних продуктів на підприємстві, необхідні підтримки системи управління якістю, сприяє, як мінімум, забезпеченню системи документообігу, поліпшити і прискорити якість управління процесами [34,35]. Автоматизація процесів управління дозволяє забезпечити своєчасність та відкритість інформації, призначеної для персоналу [36,37].

Розв'язання актуальних завдань у сфері управління якістю вимагає розробки концептуальних підходів до вдосконалення системи її оцінювання на всіх рівнях управлінської ієрархії — державному, регіональному та місцевому [7,8,17,38].

На національному рівні пріоритетом є модернізація індикаторів, які використовуються в процесах ліцензування, сертифікації та акредитації [13,39-41]. Ефективне збирання, аналіз і узагальнення інформації щодо ресурсного забезпечення підприємств, особливостей планування й організації виробничо-господарської діяльності, досягнутих результатів, а також умов, що сприяють постійному

вдосконаленню, можуть стати вагомим інструментом державної політики з високим рівнем суспільної значущості.

На регіональному рівні оцінювання якості функціонування суб'єктів господарювання здійснюється на основі аналізу ефективності заходів підтримки пріоритетних галузей економіки. Водночас на рівні окремих підприємств необхідне створення цілісної системи моніторингу та оцінки якості їх функціонування. Запровадження ефективної системи управління якістю на мікрорівні дає змогу забезпечити прозорість бізнес-процесів, підвищити рівень контрольованості операцій та активно залучати персонал до процесів безперервного удосконалення.

Останніми роками спостерігається посилене впровадження концепції загального управління якістю (Total Quality Management, TQM) у практику вітчизняних підприємств [10,17,20]. Реалізація TQM сприяє ідентифікації недоліків у поточній діяльності та формуванню шляхів їх усунення. Компанії, які орієнтуються на принципи TQM, фокусуються на безперервному вдосконаленні, що забезпечується шляхом вивчення та адаптації кращих практик як національного, так і міжнародного бізнесу.

Система TQM ґрунтується на комплексному підході до управління якістю, в основі якого – аналітичне опрацювання бізнес-процесів. Основними складовими цієї концепції є: стратегічне планування, визначення ключових показників якості, впровадження методів прийняття ефективних управлінських рішень, а також організація механізмів контролю якості.

Згідно з оцінками західних фахівців у галузі менеджменту [25,26,35-37], типові причини невдалого запровадження системи TQM включають: відсутність ефективного зворотного зв'язку з кінцевими споживачами; нечіткість стратегічних орієнтирів керівництва; слабка проробка напрямів розвитку; недостатня увага до витрат, пов'язаних із забезпеченням цільового рівня якості; недооцінювання ролі персоналу; відсутність дієвих критеріїв оцінки ефективності роботи працівників; а також неформалізованість або фрагментарність документації системи управління якістю.

Постановка завдання. Метою даної статті є дослідження питання практичного впровадження вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 на прикладі СТО ТОВ "Автодіагностика", яке розташоване в місті Кропивницький, і з'ясування методів підвищення і забезпечення належної якості транспортного обслуговування проведенням акредитації підприємств технічного сервісу.

Виклад основного матеріалу. Впровадження ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 у діяльність підприємства СТО ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСТИКА" передбачено поетапний підхід, який складався з п'яти ключових етапів.

На першому етапі було проведено аналіз поточного стану СТО, що дало можливість виявити відхилення між поточними практиками підприємства та вимогами ISO 9001:2015. Також на цьому етапі було призначено відповідальну особу з числа керівництва. Проведено попередній діагностичний аудит та створено робочу групу з фахівців основних підрозділів СТО. Крім цього розроблена дорожня карта впровадження системи управління якістю з розподілом ресурсів і строків їх реалізації.

Другий етап охоплював визначення контексту організації та зацікавлених сторін, формулювання політики у сфері якості й вимірюваних цілей, опис ключових бізнес-процесів (прийом клієнтів, діагностика, ремонт, контроль якості), розробку процедур управління документацією, персоналом, невідповідностями та обслуговуванням клієнтів.

Третій етап став практичним впровадженням системи управління, а саме:

- навчання персоналу вимогам системи управління якістю та ознайомлення їх з відповідним посадовими інструкціями;
- адаптацію процесів обслуговування до нових вимог стандарту і системи управління якістю;
- впровадження збору записів таких як акти перевірки, карти ремонту, журнал зворотного зв'язку;
- тестування ефективності процедур на пілотному відрізку.

На четвертому етапі на СТО проведено внутрішню оцінку ефективності ключових процесів - від прийому замовлень до видачі автомобіля клієнту. Здійснено внутрішній аудит відповідності вимогам ISO 9001:2015, з подальшим аналізом результативності системи управління на нараді керівництва. За результатами виявлених недоліків були розроблені й реалізовані коригувальні заходи, зокрема оновлення внутрішніх процедур, підвищення кваліфікації персоналу та вдосконалення взаємодії з клієнтами.

На завершальному етапі впровадження системи управління якістю було проведено зовнішній аудит, здійснений Національним агентством з акредитації України. За результатами цієї перевірки СТО отримала сертифікат відповідності вимогам міжнародного стандарту ISO/IEC 17025:2019 [13,14, 40,41].

Право випробувань по технічному стану колісного транспортного засобу та якості наданих послуг на АТП та СТО, автомобілів надається випробувальним лабораторіям (ВЛ). ВЛ мають атестат про акредитацію Національного агентства з акредитації України із засвідченням їх компетентності. Таке право надано випробувальній лабораторії ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСТИКА", м. Кропивницький. В зв'язку з цим структура підприємства набувала вигляду (рис.1).

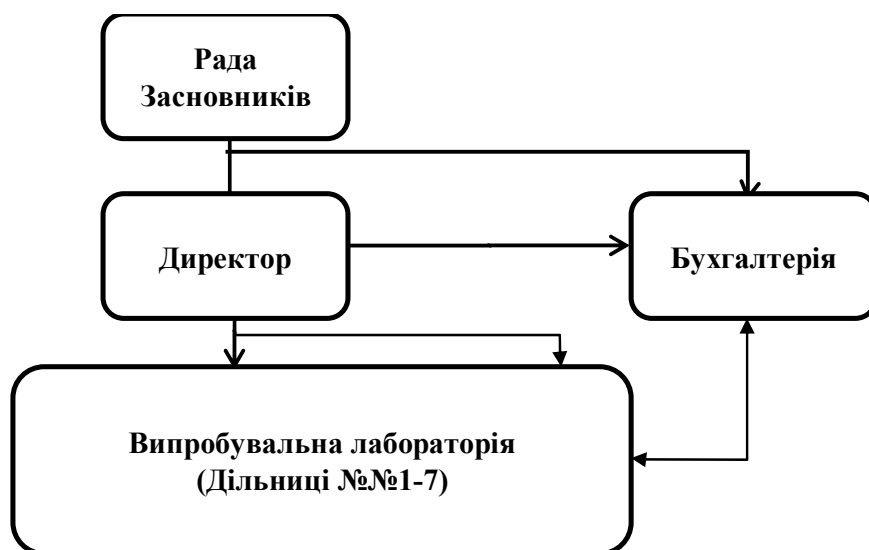


Рисунок 1 – Структура транспортного підприємства з випробувальною лабораторією

Джерело: розроблено автором з урахуванням документації по акредитації випробувальної лабораторії підприємства

Випробувальна лабораторія ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСТИКА", м. Кропивницький в своїй структурі (рис.2) має дев'ять дільниць, розміщених по Кіровоградській області.

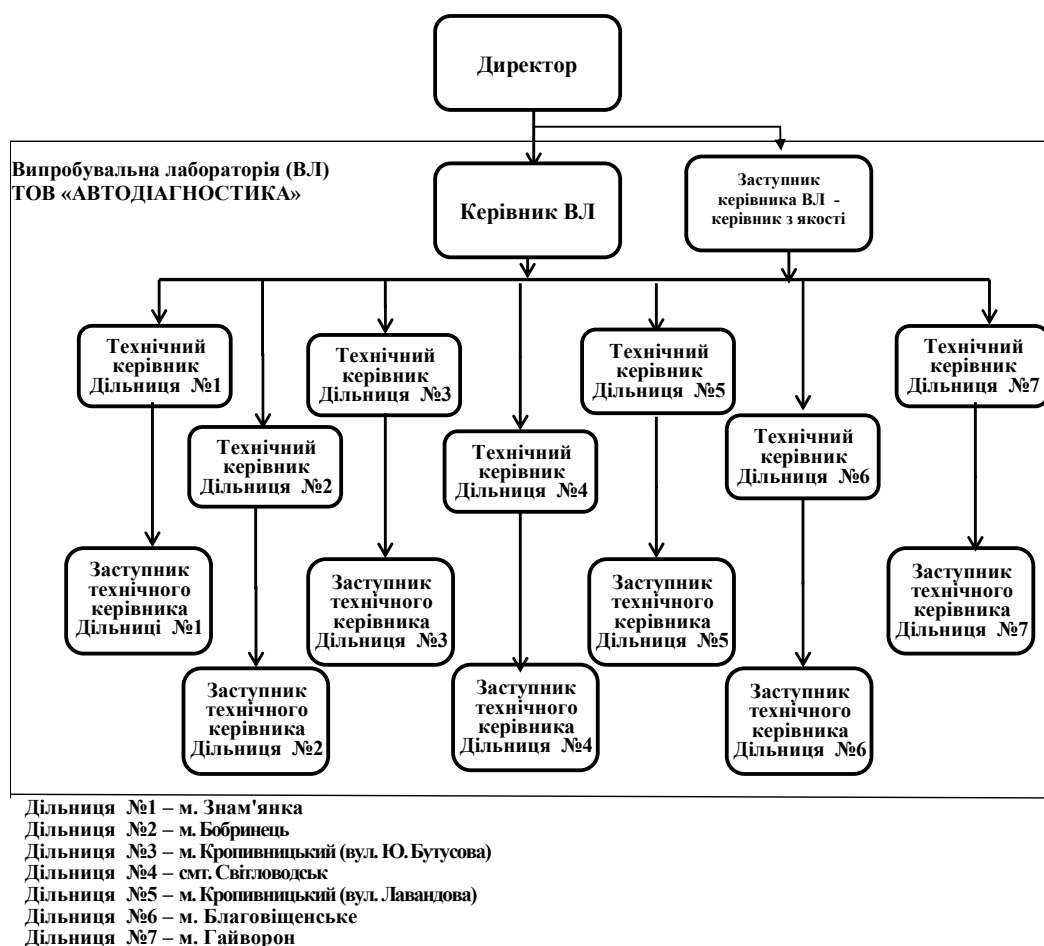


Рисунок 2 – Організаційна структура випробувальної лабораторії ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСТИКА", м. Кропивницький

Джерело: розроблено автором з урахуванням документації по акредитації

Основною метою функціонування випробувальної лабораторії [14] та організації системи якості на підприємстві транспортних послуг є:

- встановлення і задоволення результативності і ефективності потреб замовників та досягнення переваг в конкуренції;
- організація найкращої виробничої атмосфери для отримання прихильності замовників;
- встановлення послідовності процесів, завдяки яким краще можна досягти бажаних результатів;
- забезпечення та постійна підтримка впевненості зацікавлених сторін у результативності та ефективності;

Система Управління якістю та її впровадження є стратегічним рішенням керівництва підприємства, фірми, компанії та спрямоване на забезпечення надання транспортних послуг.

До обов'язків ВЛ входить проведення випробувань відповідно до вимог Стандарту України ISO/IEC 17025:2019 і задоволення потреб замовника, органів влади або організацій, що здійснюють офіційне визнання. Область діяльності ВЛ відповідно до даного Стандарту здійснюється згідно Настанови з якості та визначених процедур, які забезпечують реалізацію політики ВЛ в сфері якості стосовно того, що:

- послуги ВЛ є загальнодоступними для всіх заявників, чия діяльність відповідає сфері акредитації ВЛ;
- порядок надання послуг з випробування є доступним для заявників та

виключає можливість встановлення неприйнятних фінансових або інших умов;

- надання послуг постачальникам не зумовлено величиною постачальника або його членством в будь-якій асоціації чи групі;

- критерії оцінки продукції постачальника доступні заявнику та відповідають вимогам, встановленим у стандартах на цю продукцію;

- ВЛ не висуває вимог щодо оцінки відповідності, які виходять за межі певної її сфери.

Відповідальність за недостовірність, необ'єктивність, неточність та не конфіденційність результатів випробувань несе Керівник ВЛ. З метою забезпечення неупередженості ВЛ, яка може вплинути на результати діяльності, Керівництво ВЛ вимагає від персоналу повідомляти про будь-яку ситуацію. Відповідальність за недостовірність, необ'єктивність, неточність та не конфіденційність результатів випробувань несе Керівник ВЛ.

У ВЛ встановлені та підтримуються умови збереження конфіденційної інформації, що зберігається на паперових носіях, у тому числі документації щодо діяльності стосовно замовників. Вся конфіденційна інформація на паперових носіях зберігається в окремих шафах (столах), що замикаються. Ключі зберігаються безпосередньо у Керівника ВЛ.

Вся конфіденційна інформація (протоколи випробувань, листування із замовниками, документи системи управління) в електронному вигляді зберігається на електронно-обчислювальних машинах (комп'ютерах) та для унеможливлення втрати дублюється щоденно на флеш-носії. Всі комп'ютери у ВЛ оснащені ліцензійним програмним забезпеченням, антивірусними програмами та паролями. Обслуговуванням електронних пристроїв у ВЛ займається спеціалізований ІТ відділ компанії.

Дії ВЛ щодо конфіденційності, зберігання, шляхів відновлення, захисту даних, що зберігаються на електронних носіях визначено у ПСУ-06 "Технічні записи".

Для унеможливлення доступу до конфіденційної інформації що зберігається у ВЛ (в тому числі на паперових носіях), унеможливлення доступу та/або втручання в Обладнання, унеможливлення вільного доступу до приміщень ВЛ після закінчення робочого дня працівники ВЛ. Після зачинення входних дверей приміщень, ключі від приміщення здаються підрозділу охорони, про що робиться відповідний запис у Журналі здачі/прийняття приміщень під охорону встановленої форми (форма підрозділу охорони).

Відчинення приміщення працівником ВЛ проводиться після отримання ключів у відповідної посадової особи підрозділу охорони й зазначення в Журналі здачі/прийняття приміщень під охорону свого прізвища й часу отримання ключів.

Список працівників ВЛ, відповідальних за приміщення, затверджується Керівником ВЛ і подається до підрозділу охорони.

«Відповідній посадовій особі підрозділу охорони забороняється видавати ключі від приміщень працівникам, яких не включено до списку працівників ВЛ. У разі виявлення цілісності дверного замка приміщення відчиняється в присутності комісії, яку очолює Керівник ВЛ. До складу комісії включається відповідна посадова особа підрозділу охорони. Про відчинення приміщення комісією складається акт, який затверджується Керівником ВЛ.

У разі виявлення відсутності майна або його пошкодження особа, що виявила зазначене, повинна негайно повідомити про цей факт Керівника ВЛ, і посадову особу підрозділу охорони. Керівник ВЛ інформує про цей факт Директора ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСТИКА"» [13-14].

Керівництво підприємства надає право використовувати власну печатку ВЛ для засвідчення підпису Керівника ВЛ на документах з результатами випробувань. ВЛ наділені наступними можливостями:

– лабораторія має у своєму складі керівний і технічний персонал, який, незалежно від виконання інших функціональних обов'язків, наділений відповідними повноваженнями та забезпечений необхідними ресурсами для реалізації покладених завдань. Це охоплює впровадження, підтримання та постійне вдосконалення системи управління, виявлення випадків невідповідностей системі управління або методикам проведення випробувань, а також ініціювання коригувальних чи запобіжних дій. Розподіл функціональних обов'язків, прав та відповідальності персоналу визначається у «Положенні про випробувальну лабораторію»;

– вживає організаційних заходів, спрямованих на забезпечення незалежності керівного складу та персоналу від будь-якого необґрунтованого внутрішнього або зовнішнього впливу — фінансового, комерційного чи іншого характеру — який може негативно вплинути на об'єктивність та якість виконуваних робіт;

– забезпечує наявність декларацій персоналу щодо дотримання принципів неупередженості, об'єктивності та професійної етики у виконанні службових обов'язків;

– розробила та впровадила політику і процедури, спрямовані на збереження конфіденційності інформації та захист прав власності замовників наданих послуг.

«Відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT, ISO/IEC 17025:2017, IDT) у сфері ВЛ: випробування, перевірка конструкції та технічного стану КТЗ, їх складників категорій: M1, M2, M3, MIG, M2G, M3G (крім тролейбусів), M1S, M2S, M3S (крім тролейбусів), M1GS, M2GS, M3GS (крім тролейбусів), N1, N2, N3, NIG, N2G, N3G, N1S, N2S, N3S, NIGS, N2GS, N3GS, O1, O2, O3, O4, OIS, O2S, O3S, O4S, LI, L2, L3, L4, L5, L6, L7, Lie, L2e, L3e, L4e, L5e, L6e, L7e (в тому числі таксі, учбові КТЗ, шкільні автобуси, автобуси для перевезення інвалідів, великогабаритні та великовагові, оснащені системами живлення двигунів стисненим природним та зрідженим нафтовим газом, спеціалізовані санітарні автомобілі бригади екстреної (швидкої) медичної допомоги, призначені для перевезення небезпечних вантажів та швидкопсувних харчових продуктів)» [13,14].

ВЛ проводить дослідження наступних об'єктів:

«– КТЗ категорій M1, M1G, M1S, M1GS (у т.ч. таксі, транспортні засоби швидкої медичної допомоги (санітарні)), M2, M3, M2G, M3G, M2S, M3S, M2GS, M3GS (у т.ч. транспортні засоби (ТЗ) спеціалізовані для перевезення школярів, інвалідів); N1, N2, N3, NIG, N2G, N3G, N1S, N2S, N3S, NIGS, N2GS, N3GS (у т.ч., ТЗ, пристосовані для перевезення пасажирів, для перевезення небезпечних вантажів та швидкопсувних харчових продуктів, великовагові та великогабаритні ТЗ);

– причеи, напівпричеи категорії: O1, O2, O3, O4, O1S, O2S, O3S, O4S (у т.ч. ТЗ, призначені або пристосовані для перевезення небезпечних вантажів, швидкопсувних харчових продуктів, великогабаритні та великовагові ТЗ), а також причеи з інерційною гальмівною системою; повнопривідні автомобілі; ТЗ підвищеної прохідності, придатні для руху поза дорогами; ТЗ для навчання водінню; ТЗ з газобалонним обладнанням; ТЗ, оснащені альтернативними видами палива; автомобілі-катафалки, автомобілі-будинки, причеи для проживання, броньовані автомобілі, ТЗ, обладнані виключно для пересування осіб з інвалідністю та осіб, які їх супроводжують (в т.ч. призначених для перевезення крісел-колясок); ТЗ для транспортування людини у невідкладному стані та обладнаних для надання екстреної медичної допомоги;

– ТЗ, обладнані, як спеціалізований санітарний транспорт; автомобільні крани, пожежні автомобілі, ТЗ спеціального або спеціалізованого призначення; КТЗ категорії LI (Lie; Lie-A, Lle-B), L2 (L2e: L2e-P, L2e-U), L3 (L3e: L3e-A1, L3e-A1E, L3e-A1T, L3e-A2, L3e-A2E, L3e-A2T, L3e-A3, L3e-A3E, L3e-A3T), L4 (L4e), L5 (L5e; L5e-A, L5e-B), L6 (L6e: L6e-A, L6e-B, L6e-BP, L6e-BU), L7 (L7e: L7e-A, L7e-A1, L7e-A2, L7e-B, L7e-B1, L7e-B2, L7e-C, L7e-CP, L7e-CU);

– частин та обладнання, які можуть бути встановлені та/або використані на КТЗ» [13,14].

У ВЛ здійснюється перевірка наявності та відповідності: маркування, конструкції та технічного стану на КТЗ ременів безпеки, утримуючих систем та їх кріплень, втягувальних пристроїв і кількості точок кріплення ременів безпеки, конструкції та технічного стану елементів спеціального обладнання КТЗ, двигуни, які працюють на зрідженому нафтовому газі та стисненому природному газі вимогам до загальної безпечності конструкції та відповідності кріплення газових балонів.

Визначається екологічний клас КТЗ за маркуванням, базами даних заводів-виробників, випробувальних центрів, органів з оцінки відповідності, офіційних довідників, вмісту забруднюючих речовин та видимих забруднюючих речовин, і витрати палива та/або вимірювання витрати електроенергії і запасу ходу на електротязі, а також, щодо вимірювання витрати електроенергії і запасу ходу на електротязі.

Здійснюється вимірювання димності відпрацьованих газів колісних транспортних засобів, оснащених дизельними двигунами, а також визначення вмісту оксиду вуглецю (СО) та вуглеводнів (СН) у складі відпрацьованих газів транспортних засобів з бензиновими або газобалонними силовими установками.

Вимірюється рівень зовнішнього шуму, що створюються КТЗ. Здійснюється випробування змінних систем випуску відпрацьованих газів стосовно створюваного ними шуму КТЗ категорій М₁, N₁ та перевірка наявності та відповідності маркування, конструкції та технічного стану на КТЗ денних ходових ліхтарів. Здійснюється перевіркою наявності та відповідності маркування, конструкції та технічного стану на КТЗ дзеркал заднього виду, керма та сумарного люфта рульового механізму у складі КТЗ, потужності двигуна, сидінь та підголівників сидінь, органів керування, електричного приводу КТЗ, елементів пожежної безпеки, здійснюється оцінювання зовнішніх виступів КТЗ, за винятком випадків, що стосуються руйнівних випробувань або таких, що потребують надання креслень окремих елементів зовнішньої поверхні кузова, крім того, перевіряються маркування, конструктивні особливості та технічний стан КТЗ, призначених для перевезення небезпечних вантажів, а також зовнішні виступи транспортних засобів на предмет відповідності встановленим вимогам., встановлення замків і пристроїв кріплення дверей на КТЗ, систем електронного контролю стійкості, травмобезпеки кермового управління, працездатності та пломбування обмежувача швидкості та/або спідометра КТЗ.

Здійснюється перевірка наявності, ідентифікації (огляду), калібрування, працездатності та пломбування тахографів, зовнішніх світлових приладів щодо наявності та відповідності маркування знаком офіційного затвердження та стану конструкції, кількості, функціонування, технічний стан, що передбачені виробником.

ВЛ перевіряє наявність та відповідність маркування, конструкції та технічного стану на КТЗ: розпізнавального знаку великої довжини, передніх захисних пристроїв, захисних властивостей кабін (за винятком вимог, що пов'язані з руйнівними випробуваннями), задніх та бічних захисних пристроїв та заднього захисту КТЗ (за винятком вимог, що пов'язані з руйнівними випробуваннями), паливних автоцистерн, підлягають контролю зовнішні світлові прилади та елементи світлової сигналізації КТЗ, у тому числі спеціалізованих: таксі, шкільних автобусів, автобусів для перевезення осіб з інвалідністю, транспортних засобів із газобалонними системами живлення (на стисненому природному або зрідженому нафтовому газі), санітарних автомобілів бригад екстреної (швидкої) медичної допомоги, великогабаритних та великовагових транспортних засобів, учбових автомобілів, а також ТЗ, призначених для транспортування небезпечних вантажів або швидкопсувних харчових продуктів. Крім того, здійснюється перевірка конструктивних елементів КТЗ та справності звукових сигналів.

ВЛ визначається відповідність маркування у відношенні механізму для вимірювання швидкості, ефективності гальмівних систем КТЗ, установлення наявності та відповідності стану конструкції, кількості, функціонування, технічний стан, маркування складників і систем.

ВЛ здійснює перевірку наявності та відповідності маркування, конструкції та технічного стану на КТЗ тягово- і сидельно-зчіпного обладнання, пневматичних шин, КТЗ для перевезення швидкопсувних продуктів, технічного стану ТЗ а саме: ідентифікацію ТЗ; перевірку системи гальмування; системи керування; оглядовості; фар, світловідбивачів, електрообладнання; осей, коліс, шин та підвіски; шасі та елементів закріплених на шасі; викидів.

Придатність до експлуатації на базі ВЛ проводиться за вимогами настанови ITF/IRU (2014) "ECMT multilateral quota. User guide". При цьому враховуються методи перевірки технічного стану КТЗ за вимогами Віденської угоди 1997 року. Також здійснюються додаткові перевірки великогабаритних, великовагових КТЗ, бокових і задніх світловідбивних розпізнавальних знаків великовантажних і довгомірних ТЗ.

Точність та вірогідність випробувань, проведених ВЛ, визначає наступна сукупність факторів: людський чинник; приміщення та умови довкілля; методи випробування та оцінка придатності цих методів; обладнання; простежуваність вимірювання; поводження зі зразками; оцінка ризиків. Ступінь впливу факторів на загальну невизначеність залежить від видів випробування. ВЛ враховує ці фактори при розробці методів і процедур випробування, під час підготовки та оцінювання кваліфікації персоналу, а також під час вибору обладнання для ВЛ.

ВЛ у своїй діяльності використовує методи і процедури, що відповідають сфері її діяльності. Вони охоплюють відбирання зразків, поводження з ними, оцінювання невизначеностей вимірювань керуючись ДСТУ РМГ 43:2006 "Посібники з оцінювання невизначеності вимірювань", оцінювання придатності методів відповідно до ПСУ-07 "Вибирання та верифікація методик". Для підтвердження правильності використання та виконання за стандартизованих методів ВЛ проводить оцінювання придатності відповідно до ПСУ-07 "Вибирання та верифікація методик". В разі видання змін до стандартизованого методу процедура повторюється.

ВЛ використовує стандартні методи випробування, наведені у національних стандартах. Якщо замовник не зазначив методи, які потрібно використовувати, ВЛ вибирає відповідні методи, які викладені в національних стандартах відповідно до сфери акредитації. Про обраний метод ВЛ повідомляє замовника, а також сповіщає, якщо запропонований ним метод втратив чинність.

Зазначимо, що ВЛ не розроблює власні методи випробування, але при необхідності можлива розробка методу методу для власного використання. Перш, ніж використовувати розроблений метод оцінюється його придатність відповідно до процедури ПСУ-07 "Вибирання та верифікація методик". У разі, якщо необхідно використовувати методи, що не є стандартизованими, вони узгоджуються із замовником і містять чіткий опис вимог та цілі випробувань. Оцінка невизначеності випробувань у ВЛ розраховується згідно ДСТУ-Н РМГ 43:2006 "Посібники з висловлювання невизначеності вимірів".

Розрахунок стандартної невизначеності за типом А (u_A) проводиться шляхом статистичного аналізу результатів багатократних вимірювань:

$$u_{A,i} = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}, \quad (1)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_n$ — результати вимірювань величини x .

Розрахунок стандартної невизначеності по типу В (u_B):

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{2\sqrt{3}}, \quad (2)$$

якщо границі симетричні ($\pm b$), то розрахунок ведеться за формулою:

$$u_B(x_i) = \frac{b_i}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Сумарна стандартна невизначеність (u_c) розраховується у випадку, коли результат вимірювання виражається через значення інших величин $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}. \quad (4)$$

Розширена невизначеність (U) вихідної величини розраховується за виразом:

$$U = k \cdot u_c, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт охоплення (визначається як довірчий коефіцієнт для певного рівня довіри в разі відомого закону розподілу).

За результатами проведених обчислень складається НЯ/Ф04 "Звіт про розрахунок невизначеності вимірювань". Для збору, оброблення, реєстрування звітності, зберігання або пошуку даних випробування ВЛ керується ПСУ-06 "Технічні записи".

ВЛ повинна бути забезпечена обладнанням усіх видів для проведення випробувань згідно сфери акредитації. Обладнання та його програмне забезпечення, яке використовується для проведення випробувань, забезпечують необхідну точність і відповідають технічним вимогам, що ставляться до випробування. До введення в експлуатацію обладнання проходить калібрування. Для калібрування обладнання ВЛ співпрацює з Національними метрологічними інститутами, які мають "Угоду про взаємне визнання національних еталонів та сертифікатів калібрувань та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами" (CIPMMRA), на яку є посилання у свідоцтві по калібруванні.

У ВЛ документально оформлена процедури безпечного поводження, транспортування, зберігання, використання, планового обслуговування та метрологічного забезпечення ПСУ-02 "Обладнання" для забезпечення належного функціонування". Інструкції з використання та обслуговування обладнання належним чином актуалізуються та доступні для використання належним персоналом ВЛ. Усе обладнання ВЛ підлягає обліку. Ідентифікація обладнання проводиться відповідно до ПСУ-02 "Обладнання", для забезпечення належного функціонування.

Усе обладнання, що застосовується у ВЛ для проведення випробувань, включаючи допоміжні вимірювальні засоби, які можуть суттєво впливати на точність і достовірність отриманих результатів, підлягає калібруванню відповідно до вимог документа ПСУ-02 «Обладнання».

ВЛ самостійно не проводить калібрування свого обладнання. На постійній основі відбір проб лабораторією не здійснюється, але може проводитись як послуга на вимогу замовника. При проведенні процедури відбирання зразків випробувальна лабораторія керується процедурою якості ПСУ-15 "Відбирання зразків". ВЛ в своїй роботі використовує НД (Правила ЄЕК ООН, Постанови КМУ, Накази, ДСТУ, ГОСТ, ASTM) з питань поводження зі зразками виробів, які надані на випробування, для захисту цілості продукції, а також захисту інтересів ВЛ та замовника. У ВЛ встановлена та підтримується процедура ПСУ-05 "Поводження зі зразками замовника". У ВЛ існує система ідентифікації виробів, що випробовуються. Ідентифікація зберігається протягом усього періоду перебування зразка у ВЛ.

У ВЛ встановлена процедура ПСУ-08 "Забезпечення достовірності результатів випробувань" для контролю вірогідності невідповідної роботи. Результати реєструються таким чином, щоб можна було виявити тенденції і там, де це можливо,

застосувати статичні методи для аналізування результатів. Контролювання планується і аналізується таким чином:

- дублювання випробування з використанням тих самих або інших методів;
- повторне випробування зразків продукції.

Результати кожного випробування чи серії випробувань, які проводить ВЛ надаються точно, чітко, недвозначно та об'єктивно (Протокол випробувань). Результати випробувань реєструються та містять всю необхідну для тлумачення результатів випробувань інформацію, а також всю інформацію, що вимагається для використовуваного методу. Кожен протокол випробувань включає всю необхідну інформацію згідно нормативних документів.

Кожен протокол випробувань, паспорт якості містить, принаймні, таку інформацію:

- «– заголовок – Протокол випробування;
- назву та адресу лабораторії;
- місце проведення випробування;
- чітку ідентифікацію, що всі компоненти є частинами повного протоколу та чітку ідентифікацію кінця звіту;
- назву та контактну інформацію замовника;
- ідентифікацію використаних методів;
- опис, однозначну ідентифікацію та стан зразка;
- дату отримання зразка (зразків) для випробування, а також дату відбирання зразків;
- дату(-и) проведення випробування;
- дату видання протоколу;
- посилання на план та метод відбирання зразків, що використані лабораторією;
- заяву про те, що результати стосуються зразка, що був наданий на випробування;
- результати з одиницями вимірювання;
- доповнення, відхилення або винятки з методу;
- ідентифікацію особи (осіб), яка затверджує протокол;
- чітку ідентифікацію результатів;
- інформацію про умови довкілля;
- заяву (висновок) про відповідність вимогам
- похибки вимірювання в тих же одиницях, що і вимірювана величина, або невизначеність вимірювання (за вимогою замовника);
- де доречно, тлумачення та інтерпретації;
- додаткову інформацію, яка може вимагатися конкретним методом, регуляторними органами, замовниками, або групами замовників.

Додатково до перелічених вимог, протоколи випробувань, якщо це необхідно для тлумачення результатів випробувань містять:

- дата відбирання зразків;
- чітка ідентифікація зразка або матеріалу, що відібраний (включаючи назву виробника, модель або тип позначення та серійні номери, за необхідності);
- місце відбирання, включаючи будь-які діаграми, ескізи або фотографії;
- посилання на план відбирання зразків та метод відбирання;
- інформація, необхідна для оцінювання невизначеності вимірювання при подальшому випробуванні (за вимогою замовника)» [13,14].

Висновки.

1. Обґрунтовано напрямки підвищення якості обслуговування колісних транспортних засобів на підприємствах технічного сервісу. Визначено, що ефективним напрямком є проведення акредитації підприємства Національним агентством з акредитації України згідно вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 (EN ISO/IEC

17025:2017 IDT, ISO/IEC 17025:2017, IDT). Дано основні принципи організації системи якості на підприємстві транспортних послуг. Розроблено етапи впровадження зазначених Стандартів у діяльність підприємства ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСИКА".

2. Проаналізовано положення Національного агентства з акредитації України про створення випробувальної лабораторії на підприємствах технічного сервісу колісних транспортних засобів. Розглянуто організаційну структуру випробувальної лабораторії ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСТИКА" м. Кропивницький та її ділянки в Кіровоградській області. Визначено мету функціонування випробувальної лабораторії, її обов'язки.

3. На прикладі випробувальної лабораторії ТОВ "АВТОМОТОДІАГНОСИКА" розглянуті вимоги ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 у сфері випробування, перевірки конструкції та технічного стану колісних транспортних засобів, їх складників категорій

4. Обґрунтовані стандартизовані методи випробування колісних транспортних засобів. Показано, що розрахунок стандартизованої невизначеності проводиться шляхом статистичного аналізу. Наведено формули для розрахунку невизначеності за типом А і В та сумарної стандартної невизначеності. Зазначено способи підбору обладнання, яке використовується при випробуваннях, процедура випробувань, оформлення протоколів випробувань, їх зміст та основні вимоги.

Список літератури

1. Закон України "Про автомобільний транспорт" від 05 квітня 2001 р. № 2344-III. Відомості Верховної Ради України. 2001. № 22. Ст. 105.
2. Авер'янов В. С., Обрізан В. І. Фірмовий автосервіс в Україні. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2015. № 8 (1117). С. 96–101.
3. Аулін В. В., Гриньків А. В. Методика вибору діагностичних параметрів технічного стану транспортних засобів на основі теорії сенситивів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. № 5. С. 109–116.
4. Аулін В. В., Гриньків А. В. Проблеми і задачі ефективності системи технічної експлуатації мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2016. № 2 (77). С. 36–41.
5. Вимоги до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу, методи такої перевірки : наказ Міністерства інфраструктури України від 26 листопада 2012 р. № 710 (у редакції наказу Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 30 квітня 2024 р. № 396).
6. ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.
7. Колісник В. Моделювання управління послугами по технічному обслуговуванні та ремонту автомобілів. *Progressive research in the modern world. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference*. Boston : BoScience Publisher, 2022. Р. 538–542.
8. Левківський О. П., Туриця О. О. Фактори і організаційні принципи розвитку авторемонтних та автосервісних комплексів. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2012. Вип. 26. С. 583–587.
9. Про єдині вимоги до конструкції та технічного стану колісних транспортних засобів, що експлуатуються : постанова Кабінету Міністрів України від 22 грудня 2010 р. № 1166.
10. Криворучко О. М. Менеджмент якості на підприємствах автомобільного транспорту: теорія, методологія і практика. Харків : ХНАДУ, 2006. 404 с.
11. Назарчук Т. В. Модель розвитку внутрішнього потенціалу та конкурентного статусу підприємства. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2014. № 3, т. 3. С. 121–125.
12. Рибалко Н. В. Маркетинговий аналіз ринку автосервісних послуг. *Вісник Донецького університету економіки та права*. 2013. № 2. С. 180–183.
13. ДСТУ EN ISO/IEC 17065:2019 Оцінка відповідності. Вимоги до органів з сертифікації продукції, процесів та послуг (EN ISO/IEC 17065:2012, IDT; ISO/IEC 17065:2012, IDT).
14. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT).
15. Аулін В. В., Гриньків А. В. Теоретичне обґрунтування моментів контролю технічного стану систем і агрегатів засобів транспорту. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 8. С. 9–20.
16. Аулін В. В., Черновол М. І., Гриньків А. В. Узгодження зміни технічного стану з раціональним вибором об'єкту діагностування. *Вісник інженерної академії України*. 2015. № 2. С. 182–188.

17. Марков О. Д., Марков П. О. Критерії та показники ефективності автосервісу. Управління проектами, системний аналіз і логістика. 2013. Вип. 12. С. 110–116.
18. Аулін В. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В., Лівіцький О. М., Чернай А. Є., Голуб Д. В., Головатий А. О. Теоретичне обґрунтування управління функціонуванням технічними та транспортними системами на основі методів системної теорії інформації. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2021. Вип. 4 (35). С. 178–189.
19. Аулін В. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В., Головатий А. О., Голуб Д. В. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем : монографія / під заг. ред. В. В. Ауліна. Кропивницький : ФОП Лисенко В. Ф., 2021. 504 с.
20. Одокієнко С. М., Тарандушка Л. А., Тарандушка І. П. Розробка системи параметрів для оцінки якості процесів технічного обслуговування і ремонту автомобілів. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 3/2 (29). С. 52–56.
21. Редзюк А. М., Агеев В. Б., Мержисівський В. В. та ін. Обов'язковий технічний контроль колісних транспортних засобів : довідник. Київ : ДП "ДержавотрансНДІпроект", 2013. 620 с.
22. Система якості відповідно до норм міжнародних стандартів ISO 9000. Топ Луцьк. 2011. URL: http://toplutsk.com/articles-article_379.html
23. Berry L. L., Seltman K. D. Building a strong services brand: Lessons from Mayo Clinic. *Business Horizons*. 2007. Vol. 50, № 3. P. 199–209. doi:10.1016/j.bushor.2007.01.005.
24. Bitner M. J., Ostrom A. L., Morgan F. N. Service Blueprinting: A Practical Technique for Service Innovation. *California Management Review*. 2008. Vol. 50, № 3. P. 66–94. doi:10.2307/41166446.
25. Cisco White Paper. The Zettabyte Era: Trends and Analysis. 2017. URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visualnetworking-indexvni/vni-hyperconnectivity-wp.pdf>
26. Aulin V., Rogovskii I., Lyashuk O. et al. Comprehensive assessment of technical condition of vehicles during operation based on Harrington's desirability function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 1 (3 (127)). P. 37–46.
27. Aulin V., Mytnyk M., Hryniv A., Holovaty A., Lysenko S., Plekan U. Prediction of recognized defect combinations in the parts of automobile units, systems, and assemblies using artificial neural network method. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. P. 444–451.
28. Карпенко О. А. Життєвий цикл як попереджуючий фактор негативних наслідків циклічності. Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів: зб. наук. пр. Київ : НТУ; ТАУ, 2003. Вип. 16. С. 274–279.
29. Мастепан М. А., Мінаков Д. М., Волобуєва Т. В., Каверін О. С. Аналіз залежності рівня попиту послуг автосервісу від платоспроможності споживачів. *East European Journal of Advanced Technologies*. 2012. № 3/2(57). С. 25–27.
30. Погорелов М. Г., Мастепан С. М., Субочев О. І., Субочева В. О., Гуляєв М. М. Формування процесу прогнозування попиту на автосервісні послуги. *Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт*. 2012. Вип. 135. С. 240–243.
31. Должанський І. З., Загорна Т. О., Удалих О. О. Управління потенціалом підприємства. Київ : ЦУЛ, 2006. 362 с.
32. Січко О. Є., Мінаков Д. М. Розробка модифікованої методики визначення параметрів потоку вимог на послуги з ТО та ремонту автомобілів. *Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт*. 2012. Вип. 135. С. 214–217.
33. Аулін В. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. та ін. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2020. № 22. С. 162–174.
34. Distributorships Dealerships. URL: <https://www.inc.com/encyclopedia/distributorships-and-dealerships.html>
35. Meuter M. L., Bitner M. J., Ostrom A. L., Brown S. W. Choosing Among Alternative Service Delivery Modes: An Investigation of Customer Trial of Self-Service Technologies. *Journal of Marketing*. 2005. Vol. 69, № 2. P. 61–83. doi:10.1509/jmkg.69.2.61.60759
36. Stevanovic I., Stanojevic D., Nedic A. Setting the after sale process and quality control at car dealerships to the purpose of increasing clients satisfaction. *Journal of Applied Engineering Science*. 2013. Vol. 11, № 2. P. 81–88. doi:10.5937/jaes11-3821
37. Things to Look for When Choosing a Car Service Garage. URL: <https://www.dowleys.co.uk/blog/5-things-to-look-for-when-choosing-a-car-servicegarage/>
38. Рибалко Н. В. Управління якістю послуг на підприємствах автосервісу : автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.00.04. Полтава : Полтавський університет споживчої кооперації України, 2008. 21 с.
39. Деякі питання сертифікації транспортних засобів, їх частин та обладнання : постанова Кабінету Міністрів України від 09 червня 2011 р. № 738.
40. ДСТУ EN ISO/IEC 17020:2019 Оцінка відповідності. Вимоги до роботи різних типів органів з інспектування (EN ISO/IEC 17020:2012, IDT; ISO/IEC 17020:2012, IDT).

41. ДСТУ EN ISO/IEC 17024:2019 Оцінка відповідності. Загальні вимоги до органів, що проводять сертифікацію персоналу (EN ISO/IEC 17024:2012, IDT; ISO/IEC 17024:2012, IDT).

References

1. Law of Ukraine “Pro avtomobil'nyy transport” [On automobile transport]. (2001, April 5). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, 22, Art. 105 [in Ukrainian].
2. Averyanov, V. S., & Obrizan, V. I. (2015). Firmovy avtosevis v Ukraini [Branded car service in Ukraine]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI"*, 8(1117), 96–101 [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., & Hryn'kiv, A. V. (2016). Metodyka vyboru diahnostychnykh parametrov tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv [Method for selecting diagnostic parameters of vehicle technical condition]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, 5, 109–116 [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V., & Hryn'kiv, A. V. (2016). Problemy i zadachi efektyvnosti systemy tekhnichnoi eksploatatsii mobilnoi sil'skohospodars'koi ta avtotransportnoi tekhniki. *Visnyk Zhytomyr'skoho derzhavnoho tekhnol. un-tu. Ser.: Tekhnichni nauky*, 2(77), 36–41 [in Ukrainian].
5. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2012). *Vymohy do perevirky konstruktiv ta tekhnichnoho stanu kolisnogo transportnoho zasobu: Nakaz № 710* (as amended by Nakaz № 396, 2024) [in Ukrainian].
6. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2015). *DSTU ISO 9001:2015. Quality management systems. Requirements (ISO 9001:2015, IDT)*. Kyiv: DP “UkrNDNTs” [in Ukrainian].
7. Kolisnyk, V. (2022). Modeliuvannya upravlinnia posluhamy z tekhnichnoho obsluhovuvannya ta remontu avtomobiliv. In *Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference “Progressive research in the modern world”* (pp. 538–542). Boston: BoScience Publisher.
8. Levkivskiy, O. P., & Turytsia, O. O. (2012). Faktory i orhanizatsiini pryntsypy rozvytku avtoremontnykh ta avtosevisnykh kompleksiv. *Visnyk NTUU “KPI”*, 26, 583–587 [in Ukrainian].
9. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2010). *Pro yedyni vymohy do konstruktiv ta tekhnichnoho stanu kolisnykh transportnykh zasobiv: Postanova № 1166* [in Ukrainian].
10. Kryvoruchko, O. M. (2006). *Menedzhment yakosti na pidpriemstvakh avtomobil'noho transportu: teoriia, metodolohiia i praktyka*. Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
11. Nazarchuk, T. V. (2014). Model' rozvytku vnutrishnoho potentsialu ta konkurentnoho statusu pidpriemstva. *Visnyk Khmel'nyts'koho nats. un-tu*, 3(3), 121–125 [in Ukrainian].
12. Rybal'ko, N. V. (2013). Marketynhovy analiz rynku avtosevisnykh posluh. *Visnyk Donets'koho un-tu ekonomiky ta prava*, 2, 180–183 [in Ukrainian].
13. Derzhstandart Ukrainy. (2019). *DSTU EN ISO/IEC 17065:2019. Conformity assessment — Requirements for bodies certifying products, processes and services (IDT)* [in Ukrainian].
14. Derzhstandart Ukrainy. (2019). *DSTU EN ISO/IEC 17025:2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (IDT)* [in Ukrainian].
15. Aulin, V. V., & Hryn'kiv, A. V. (2017). Teoretychne obgruntuvannya momentiv kontroliu tekhnichnoho stanu system i ahrehativ zasobiv transportu. *Tekhnichniy servis...*, 8, 9–20 [in Ukrainian].
16. Aulin, V. V., Chernovol, M. I., & Hryn'kiv, A. V. (2015). Uzghodzhennia zminy tekhnichnoho stanu z ratsionalnym vyborom obiekta diahnostuvannya. *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy*, 2, 182–188 [in Ukrainian].
17. Markov, O. D., & Markov, P. O. (2013). Kryterii ta pokaznyky efektyvnosti avtosevisu. *Upravlinnia proiektamy, systemnyi analiz i lohistyka*, 12, 110–116 [in Ukrainian].
18. Aulin, V. V., et al. (2021). Teoretychne obgruntuvannya upravlinnia funktsionuvanniam tekhnichnymy ta transportnymy systemamy. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 4(35), 178–189 [in Ukrainian].
19. Aulin, V. V., et al. (2021). *Teoretychni i metodolohichni osnovy lohistyky transportnykh i vyrobnychykh system* (V. V. Aulin, Ed.). Kropyvnytskyi: FOP Lysenko V. F. [in Ukrainian].
20. Odokiienko, S. M., Tarandushka, L. A., & Tarandushka, I. P. (2016). Rozrobka systemy parametrov dlia otsinky yakosti protsesiv TO i remontu. *Tekhnolohichnyi audyt...*, 3/2(29), 52–56 [in Ukrainian].
21. Redziuk, A. M., Ageiev, V. B., Merzhyevskiy, V. V., et al. (2013). *Oboviazkovyi tekhnichniy kontrol' kolisnykh transportnykh zasobiv: Dovidnyk*. Kyiv: DP “DerzhavtotransNDIproekt” [in Ukrainian].
22. Top Lutsk. (2011). *Systema yakosti vidpovidno do norm mizhnarodnykh standartiv ISO 9000*. http://toplutsk.com/articles-article_379.html (accessed April 18, 2025) [in Ukrainian].
23. Berry, L. L., & Seltman, K. D. (2007). Building a strong services brand: Lessons from Mayo Clinic. *Business Horizons*, 50(3), 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2007.01.005>
24. Bitner, M. J., Ostrom, A. L., & Morgan, F. N. (2008). Service blueprinting: A practical technique for service innovation. *California Management Review*, 50(3), 66–94. <https://doi.org/10.2307/41166446>
25. Cisco. (2017). *The Zettabyte Era: Trends and analysis*. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visualnetworking-indexvni/vni-hyperconnectivity-wp.pdf>
26. Aulin, V., Rogovskii, I., Lyashuk, O., et al. (2024). Comprehensive assessment of technical condition of vehicles... *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3 (127)), 37–46.
27. Aulin, V., Mytnyk, M., Hryn'kiv, A., et al. (2024). Prediction of recognized defect combinations... *Procedia Structural Integrity*, 59, 444–451.
28. Karpenko, O. A. (2003). Zhyttievyy tsykl yak poperedzhuiuchy faktor... *Systemni metody...*, 16, 274–279 [in Ukrainian].

29. Mastepan, M. A., Minakov, D. M., Volobuieva, T. V., & Kaverin, O. S. (2012). Analiz popytu na avtosevis... *East European Journal of Advanced Technologies*, 3/2(57), 25–27 [in Ukrainian].
30. Pohorielov, M. H., et al. (2012). Formuvannia protsesu prohnozuvannia popytu... *Visnyk SevNTU. Mashynopryladobuduvannia ta transport*, 135, 240–243 [in Ukrainian].
31. Dolzhanskyi, I. Z., Zahorna, T. O., & Udalyk, O. O. (2006). *Upravlinnia potentsialom pidpriemstva*. Kyiv: TsUL [in Ukrainian].
32. Sichko, O. Ye., & Minakov, D. M. (2012). Rozrobka metodyky vyznachennia parametriv TO. *Visnyk SevNTU...*, 135, 214–217 [in Ukrainian].
33. Aulin, V. V., et al. (2020). Pryntsypy pobudovy kyberfizychnoi systemy TO. *Tekhnichniy servis...*, 22, 162–174 [in Ukrainian].
34. Distributorships and Dealerships. (n.d.). <https://www.inc.com/encyclopedia/distributorships-and-dealerships.html>
35. Meuter, M. L., Bitner, M. J., Ostrom, A. L., & Brown, S. W. (2005). Choosing among alternative service delivery modes... *Journal of Marketing*, 69(2), 61–83. <https://doi.org/10.1509/jmkg.69.2.61.60759>
36. Stevanovic, I., Stanojevic, D., & Nedic, A. (2013). Setting the after sale process... *Journal of Applied Engineering Science*, 11(2), 81–88. <https://doi.org/10.5937/jaes11-3821>
37. Dowleys. (n.d.). *Things to look for when choosing a car service garage*. <https://www.dowleys.co.uk/blog/5-things-to-look-for-when-choosing-a-car-service-garage/>
38. Rybal'ko, N. V. (2008). *Upravlinnia yakistiu posluh na pidpriemstvakh avtosevisu: Extended abstract of candidate's thesis*. Poltava: PU of Consumer Cooperation of Ukraine [in Ukrainian].
39. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2011). *Deiaki pytannia sertyfikatsii transportnykh zasobiv...*: *Postanova № 738* [in Ukrainian].
40. Derzhstandart Ukrainy. (2019). *DSTU EN ISO/IEC 17020:2019. Conformity assessment... (IDT)* [in Ukrainian].
41. Derzhstandart Ukrainy. (2019). *DSTU EN ISO/IEC 17024:2019. General requirements for bodies certifying personnel (IDT)* [in Ukrainian].

Andrii Serhiichuk, Viktor Aulin, Dr. Tech. Sci., **Andrii Hrynkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Andrii Serhiichuk**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Ensuring the Proper Level of Quality of Services Provided by Wheeled Vehicle Technical Service Enterprises by Conducting Their Accreditation

The article considers the problem of ensuring the proper level of quality of services provided by enterprises of technical service of wheeled vehicles during their accreditation through the creation of a testing laboratory. The main directions of improving the quality of technical service of wheeled vehicles with the implementation of ISO 9001:2015, DSTU EN ISO/IEC 17025:2019 Standards are analyzed. It is noted that the quality management system of transport services at the enterprise must take into account their specifics. The stages of forming a quality management system without implementation and with the implementation of a testing laboratory for checking the design and technical condition of wheeled vehicles are determined. It is shown that the directions of ensuring the proper level of quality of services provided by the enterprise "AUTOMOTODIAGNOSTIKA" LLC are formed using the concept of Total Quality Management - comprehensive quality management at the enterprise. Five stages of implementing DSTU ISO/IEC 17085:2019 in the activities of the enterprise of the technical service station "AUTOMOTODIAGNOSTIKA" LLC are developed. It should be noted that at the final stage of the implementation of the STANDARD, an external audit by the National Accreditation Agency of Ukraine is envisaged. As a result of the inspection of the technical service enterprise, a certificate of conformity to the international standard ISO/IEC 17025:2019 was issued. To certify the positive passage of accreditations, the right to create a testing laboratory for the design and technical condition of wheeled vehicles is granted.

Changes in the structure of the enterprise are determined and the organizational structure of the testing laboratory at LLC "AUTOMOTODIAGNOSTIKA" in Kropyvnytskyi is given and its main sections are indicated. The goal, main tasks, mandatory guidelines for the provision of services by the testing laboratory are formulated. Requirements for the information received regarding the testing of wheeled vehicles, its confidentiality are formulated.

The capabilities of the testing laboratory, its functioning and research objects are determined. According to DSTU EN ISO/IEC 17025:2019, it is shown what studies of wheeled vehicles the testing laboratory conducts: categories of vehicles, trailers and semi-trailers, equipment. The types of inspections and levels of processes in units, systems and assemblies of wheeled vehicles are indicated. It is shown what methods and techniques and equipment the testing laboratory uses in its activities. The requirements for drawing up test reports (protocols) are determined and what information the test protocol should contain.

quality, wheeled vehicle, enterprises, technical service, standard, accreditation, testing laboratory

Одержано (Received) 19.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 21.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.05.2025

УДК 65.018

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.364-370](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.364-370)**Л. А. Тарандушка**, проф., д-р техн. наук, **І. П. Тарандушка***Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна,**e-mail: tarandushkal@ukr.net*

Розробка морфологічної матриці системи нанесення лакофарбового покриття для забезпечення можливості прогнозування якості відновлювального лакофарбового покриття на кузовних деталях автомобіля

На основі методу морфологічного аналізу розроблено морфологічну матрицю, що описує систему нанесення лакофарбового покриття, яка складається з морфологічних структур та морфологічних ознак для можливості прогнозування якості лакофарбового покриття на кузовних деталях, що підлягають ремонту. Градація кількісних варіантів морфологічних ознак визначалася за допомогою методу кількісних оцінок. Поєднання окремих варіантів усіх морфологічних ознак формує нову морфологічну структуру системи нанесення лакофарбового покриття.

лакофарбове покриття, відновлення, морфологічна матриця, якість

Постановка проблеми. Підвищення ефективності роботи малярно-кузовного сервісу за рахунок забезпечення необхідних умов для отримання якісного лакофарбового покриття є важливою складовою систем автосервісу, що надають послуги з відновлення кузовних деталей.

Фарбування є складним технологічним процесом, що потребує від працівників глибокого розуміння як теоретичних аспектів, так і практичних деталей його виконання. Цей процес охоплює низку етапів – від первинного огляду та оцінки обсягу ремонту до завершального полірування. Важливо дотримуватися встановленої послідовності дій і точно виконувати всі необхідні дії на кожному етапі, щоб забезпечити якісне лакофарбове покриття, яке відповідає за кольором з неремонтованими частинами кузова [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації Гнатов А.В. та Аргуна І.В. [2] було проаналізовано чинники, що впливають на якість ремонту кузова автомобілів, а також розроблено схему взаємозв'язку основних етапів цього процесу. Авторами запропоновано методику комплексного оцінювання якості кузовного ремонту, що базується на анкетуванні як замовників, так і виконавців робіт.

У дослідженні [3] розглядається ефективне використання ресурсів малярно-кузовного цеху, проводиться класифікація ресурсних втрат та пропонуються методи їх виявлення. У роботі [4] подано модель управління якістю технічного обслуговування та ремонту автомобілів, а також визначено ключові параметри, що впливають на якість наданих послуг. Дослідники Molina J, Solanes J. E., Arnal L. та Tornero J. [5] розглядали шляхи зниження витрат і підвищення якості малярно-кузовних робіт під час ремонту легкових автомобілів шляхом оптимізації характеристик комплектуючих елементів фарбувально-сушильних камер. Тригуб О.А. розглядає обладнання, що використовується для якісного нанесення лакофарбового покриття [6].

В роботах [7-9] розглянуто технології та методики моніторингу показників якості технічного обслуговування та ремонту автомобілів.

В [10] досліджено технічні характеристики фарборозпилювачів.

Постановка завдання. Таким чином метою даного дослідження є розробка морфологічної матриці системи нанесення лакофарбового покриття на основі базових її параметрів для забезпечення можливості прогнозування якості лакофарбового покриття, кузовних деталей автомобілів, що ремонтуються.

Виклад основного матеріалу.

Фарбування є одним із основних методів захисту кузова автомобіля від корозійних процесів, а також забезпечує привабливий зовнішній вигляд транспортного засобу. Захисна функція лакофарбового покриття (ЛФП) полягає в утворенні на металевій поверхні суцільної захисної плівки. Ця плівка ізолює метал від зовнішніх впливів, запобігаючи проникненню агресивних середовищ до основи й тим самим захищає її від корозії. Ефективність ЛФП залежить від низки чинників: сили зчеплення плівки з основою, її цілісності, дії пігментів та інших фізико-хімічних характеристик. У сукупності ці властивості визначають загальний рівень антикорозійного захисту.

У виробничому процесі фарбування відіграє важливу роль, займаючи до 10% від загального обсягу трудових витрат. Це пояснюється складністю лакофарбових систем, що використовуються в автомобілебудуванні. Вони включають кілька шарів – ґрунтовки, емалі, лаки – кожен із яких має власну технологію нанесення та сушіння. Сучасні системи покриттів представляють собою комплексні багатошарові рішення, що включають матеріали для підготовки основи, проміжних шарів і остаточного декоративного покриття.

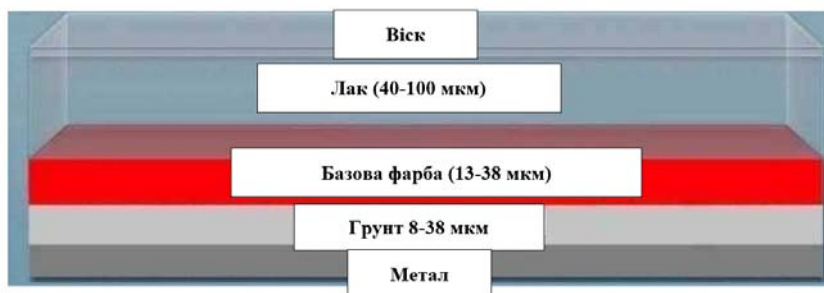


Рисунок 1 - Структура лакофарбового покриття

Джерело: розроблено авторами

Структура автомобільного лакофарбового покриття передбачає поетапне виконання всіх стадій фарбування, що включає попередню підготовку металевій поверхні, ґрунтування, шпаклювання, а також нанесення проміжного та остаточного шару фарби.

Більшість компаній-виробників лакофарбових матеріалів для автомобільного сегменту пропонують повні комплексні системи, до складу яких входять усі необхідні компоненти для відновлення покриття: ґрунти, шпаклівки, базові емалі, лаки, а також відповідні розріджувачі та затверджувачі.

Фарбування кузовних елементів автомобіля є складним і трудомістким технологічним процесом, успішне виконання якого можливе лише за умови чіткого дотримання технологічних норм. Підготовка поверхні деталі до фарбування починається зі шліфування залишків попереднього лакофарбового покриття за допомогою мокрого або сухого абразивного оброблення зернистістю Р120. У випадку виявлення слідів корозії їх обробляють до чистого металу. Усі зони, що підлягали виправленню або рихтуванню, а також прилеглі ділянки шліфують для забезпечення рівномірного переходу між відновленою та оригінальною частиною покриття.

Подальше шліфування проводиться абразивом зернистістю Р180-400. Результатом цього процесу є отримання поверхні, яка повністю готова до нанесення нового шару фарби (рис.2).

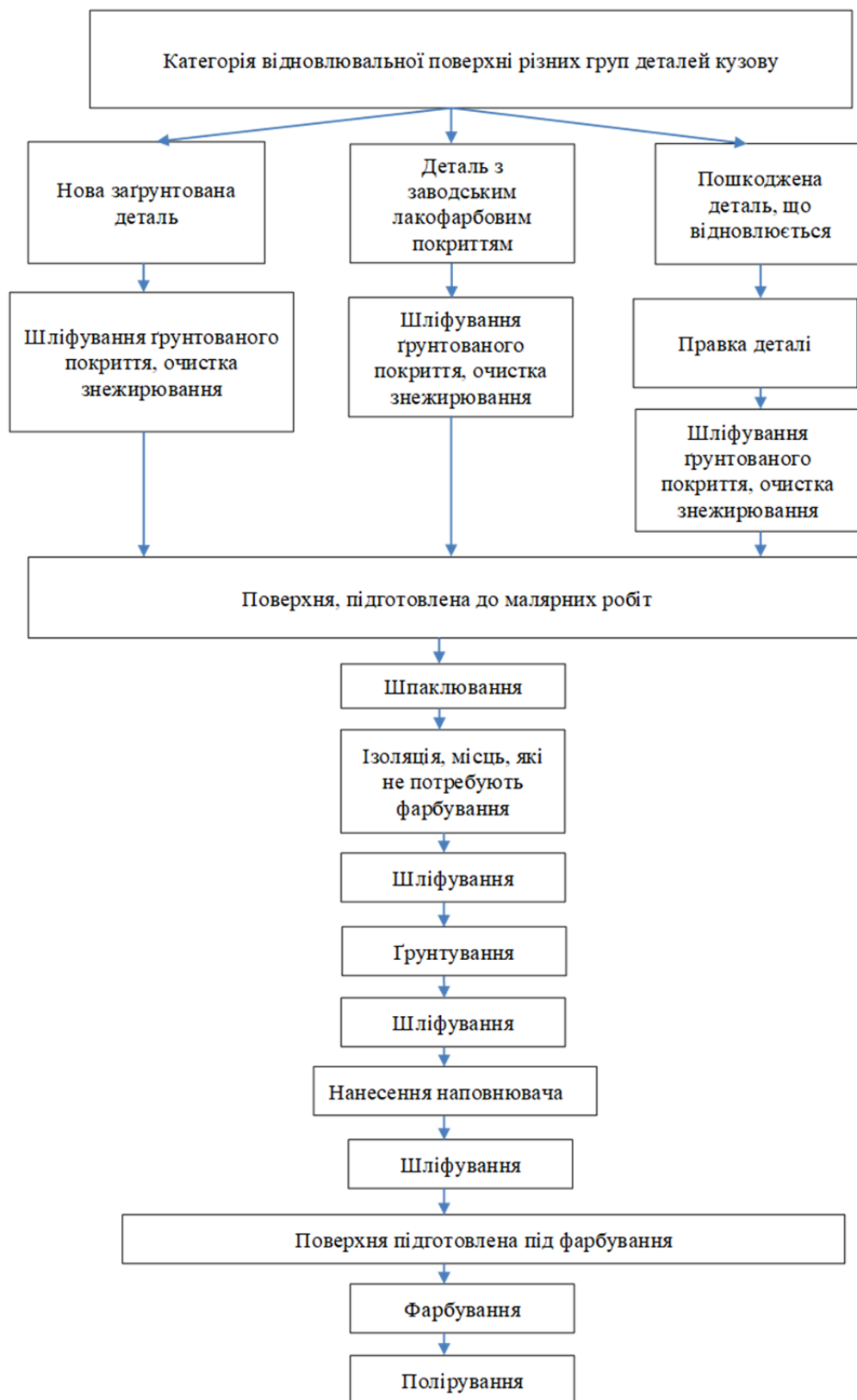


Рисунок 2 – Схема процесу підготовки поверхні до фарбування

Джерело: розроблено авторами

На етапі підготовки кузовних елементів до фарбування виконуються такі основні операції: нанесення шпаклівки, захист елементів, що не підлягають фарбуванню, шліфування зашпакльованих зон, ґрунтування з подальшим шліфуванням, а також нанесення і обробка ґрунту-наповнювача.

Залежно від виду ремонту лакофарбового покриття використовують різні типи шпаклівок, які відрізняються між собою за зернистістю, наповненістю, еластичністю та стійкістю до механічних пошкоджень. Серед них – скловолокнисті, алюмінієві, легкі, пластичні шпаклівки, а також спеціальні варіанти з пластифікаторами для деталей із пластику. При їх застосуванні важливо суворо дотримуватись технологічних рекомендацій виробника.

Після вирівнювання шпаклівки наносять шар ґрунту, який забезпечує заповнення мікротріщин і покращує зчеплення наступних шарів покриття. Існують різні види ґрунтовок: антикорозійні, наповнювачі, ізолятори – кожен із них має свій хімічний склад і технологію нанесення.

Одним із важливих моментів у ремонті є точний підбір кольору фарби. Для цього автовиробники розробляють системи ідентифікації кольорів, які включають коди та назви, що зазвичай розміщуються на спеціальних табличках на кузові. Повна інформація про відтінки також надається в каталогах.

Процес підбору кольору здійснюється на основі рецептур, запропонованих виробниками лакофарбових матеріалів. Для досягнення максимальної відповідності фактичному кольору застосовуються спеціалізовані системи підбору, що включають програмне забезпечення та відповідне обладнання.

Фарбування виконується у фарбувальних камерах з використанням професійних пістолетів-розпилювачів. Перед фарбуванням поверхню ретельно очищують засобами для видалення смол та силікону, а також протирають спеціальною тканиною, що утримує пил. Зазвичай фарба наноситься у два шари: другий шар – після висихання першого. Після завершення нанесення останнього шару виконується сушка, і лише тоді деталь можна монтувати. Як правило, поверхню додатково покривають прозорим лаком. Повна стабілізація фарби триває 7–10 днів, після чого допускаються зовнішні впливи, такі як миття автомобіля.

Для визначення шляхів вдосконалення якості лакофарбового покриття застосовуємо метод морфологічного аналізу. За допомогою цього методу можливо систематизувати дані, які забезпечують процес нанесення лакофарбового покриття та виконати аналіз можливих їх конфігурацій.

Для отримання якісного лакофарбового покриття на поверхні автомобільних деталей, що відновлюються, необхідно враховувати фактори, що впливають на якість цього покриття. Для максимального врахування основних факторів та визначення ступеня їхньої важливості пропонується розробити морфологічну матрицю. В ході дослідження було виявлено морфологічні структури, від яких залежить якість лакофарбового покриття, а саме: «Фарбувальна камера», «Фарборозпилювачі», «Джерело стисненого повітря», «Матеріал, що наноситься», «Технологія нанесення покриття».

Отже, необхідно описати кожную морфологічну структуру морфологічними ознаками.

Морфологічну структуру «Фарбувальна камера» можна описати морфологічними ознаками: «1. Вентиляція», «2. Освітлення», «3. Теплообмінник», «4. Піч полімеризації (принцип роботи)». Морфологічна ознака «Вентиляція» має три можливих варіанти, що застосовуються в системах автосервісу, а саме: 1.1. Припливно-втяжна; 1.2. Одномоторна; 1.3. Двомоторна.

Морфологічна ознака «2. Освітлення» має три можливих варіанти, що регламентуються будівельними стандартами, а саме: 2.1. Стінове; 2.2. Стельове; 2.3.

Стінове + Стельове.

Морфологічними ознака «3. Теплообмінник» описує принцип роботи фарбувальної камери і має два можливі варіанти: 3.1. Рекуперативний та 3.2. Регенеративний.

Морфологічна ознака «4. Піч полімеризації (принцип роботи)» в описі фарбувальної камери може приймати один з трьох варіантів: 4.1. Відсутня піч полімеризації; 4.2. Конвективний принцип роботи печі; 4.3. Променистий теплообмін (інфрачервоний) принцип роботи печі.

Морфологічну структуру «Фарборозпилювачі» можна описати морфологічними ознаками: «5. Подача фарби» та «6. Розмір дюзи, мм». Відповідно, морфологічна ознака «5. Подача фарби» може приймати два значення: 5.1. Самоплинна; 5.2. Під тиском. Морфологічна ознака «6. Розмір дюзи, мм» описується трьома можливими варіантами: 6.1. 1,2мм; 6.2. 1,3 -1,6 мм; 6.3. 1,4-1,7 мм.

Морфологічну структуру «Джерело стисненого повітря» описуємо двома морфологічними ознаками: «7. Тип джерела», що може приймати два можливі варіанти: 7.1. Компресор та 7.2. Турбіна, а також та «8. Потужність, мПа», що може приймати один з трьох варіантів: 8.1. Мала потужність в діапазоні 0-0,19 мПа; 8.2. Оптимальна потужність в діапазоні 0,20 - 0,30 мПа та 8.3. Надмірна потужність в діапазоні 0,31-0,60 мПа.

Морфологічна структура «Матеріал, що наноситься» описується п'ятьма морфологічними ознаками: «9. Тип матеріалу», «10. Тип розріджувача», «11. Кількість розріджувача», «12. Кількість затверджувача», «13. Температура матеріалу, □».

Морфологічна ознака «9. Тип матеріалу» може приймати один з трьох варіантів 9.1. Лак; 9.2. Рідка фарба; 9.3. Порошкова фарба.

Морфологічна ознака «10. Тип розріджувача» описується одним з трьох можливих варіантів: 10.1. Відсутній; 10.2. Повільний; 10.3. Швидкий.

Морфологічна ознака «11. Кількість розріджувача» розраховується як відношення кількості матеріалу, що наноситься до кількості розріджувача та може приймати значення: 11.1. Мала в діапазоні 0-0,19; 11.2. Оптимальна 0,2; 11.3. Велика в діапазоні 0,21-0,3; 11.4. Надмірна в діапазоні 0,31-1,0.

Морфологічна ознака «12. Кількість затверджувача» визначається як частка від кількості матеріалу, що наноситься та може приймати значення: 12.1. Мала в діапазоні 0-0,49; 12.2. Оптимальна 0,5; 12.3. Висока в діапазоні 0,51-0,6; 12.4. Надмірна в діапазоні 0,61-1,0.

Морфологічна ознака «13. Температура матеріалу, □» може приймати три варіанти: 13.1. Низька в діапазоні 15-19 ; 13.2. Оптимальна в діапазоні 20-22 □; 13.3. Висока в діапазоні 23-27 □.

Морфологічну структуру «Технологія нанесення покриття» можна описати трьома морфологічними ознаками: «14. Техніка нанесення»; «15. Відстань від фарбопульта до основи, см»; «16. Кількість шарів».

В свою чергу, морфологічна ознака «14. Техніка нанесення» може описуватися трьома варіантами: 14.1. Вертикально; 14.2. Горизонтально; 14.3. Вертикально + Горизонтально.

Морфологічна ознака «15. Відстань від фарбопульта до основи, см» може приймати одне з трьох значень: 15.1. 10-19 см; 15.2. 20-9 см; 15.3. 30-40 см.

Морфологічна ознака «16. Кількість шарів» може описуватися трьома варіантами: 16.1. - 1; 16.2. - 2; 16.3 - 3.

Отже, для кожної з 16 морфологічних ознак визначено варіанти реалізації, що представлені в табл. 1, тобто система нанесення лакофарбового покриття описується морфологічною матрицею (табл.1).

Таблиця 1 – Морфологічна матриця системи нанесення лакофарбового покриття

Фарбувальна камера				Фарбопульти (фарборозпилювачі)		Джерело стисненого повітря		Матеріали, що наносяться					Технологія нанесення покриття		
1. Вентиляція	2. Освітлення	3. Теплообмінник	4. Пін полімеризації (принцип роботи)	5. Подача фарби	6. Розмір дюзи, мм	7. Тип джерела	8. Потужність, мПа	9. Тип матеріалу	10. Тип розсіювача	11. Кількість розсіювача	12. Кількість затверджувача	13. Температура матеріалу, °C	14. Техніка нанесення	15. Відстань від фарбопульта до основи, см	16. Кількість шарів
1.1. Приплив но-витажна 1	2.1. Стінове 1	3.1. Рекупера-тивний 1	4.1. Відсутня 1	5.1. Самотьок ові 1	6.1. 1,2 1	7.1. Компрес ор 1	8.1. Мала 0-0,19	9.1. Лак 1	10.1. Відсутній 1	11.1. Мала 0-0,19	12.1. Мала 0-0,49	13.1. Низька 15-19	14.1. Вертикаль но 1	15.1. 10-19	16.1 1
1.2. Одно-моторна 2	2.2. Стельове 2		4.2. Конвектив ний 2		6.2. 1,3-1,6 2		8.2. Оптимал ьна 0,20-0,30	9.2. Рідка фарба 2	10.2. Повільний 2	11. Оптимал ьна 0,2			14.2. Горизонта льно 2	15.2. 20-29	
1.3. Дво-моторна 3	2.3. Стельове +стінове 3	3.2. Регенера-тивний 2	4.3. Променис тий теплообм ін (інфрачер воний) 3	5.2. Під тиском 2	6.3. 1,4-1,7 3	7.2. Турбіна 2	8.3. Надмірна 0,31-0,60	9.3. Порошко ва фарба 3	10.3. Швидкий 3	11.3. Велика 0,21-0,3	12.2. оптималь на 0,50	13.2. Оптималь на 20-22	14.3. Вертикаль но+Горизо нтально 3	15.3. 30-40	16.2 2
										11.4. Надмірна 0,31-1	12.3. Висока 0,51-0,60	13.3. Висока 23-27			16.3 3
											12.4. Надмірна 0,61-1				

Висновки. В результаті аналізу технологій відновлення лакофарбового покриття кузовних деталей автомобілів було розроблено морфологічну матрицю системи нанесення лакофарбового покриття на основі базових її параметрів. Використовуючи морфологічну матрицю стає можливим проводити аналіз будь-якої комбінації морфологічних ознак та обрати найкращу з них для забезпечення високої якості поверхні лакофарбового покриття кузовних деталей автомобіля після їх відновлення.

Список літератури

1. Тарандушка Л. А. Організація проведення обов'язкового технічного контролю автотранспортних засобів. Черкаси : Вертикаль, видавець Кандич С. Г., 2025. 144 с.
2. Гнатов А.В., Аргун І.В. Сучасні технології зовнішнього магнітноімпульсного кузовного ремонту автомобілів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 4. С.103-108.
3. Kipriyanov F. A., Shushkov R. A., Mikhailov A. S. Quality research of paintwork of Volkswagen Tuareg car body elements June 2020 IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 832(1), 012008. DOI:10.1088/1757-899X/832/1/012008.
4. Тарандушка Л.А. Побудова функціональної моделі автосервісного підприємства. *Вісник Національного транспортного університету*. 2020. №1(46). С. 333–340.
5. Molina J, Solanes J E, Arnal L and Tornero J (2017) On the detection of defects on specular car body surfaces. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, p. 263–78. doi:10.1016/j.rcim.2017.04.009.
6. Тригуб О. А. Технологічне обладнання для обслуговування та ремонту автомобілів : навч. посіб. Черкаси : ЧДТУ, 2021. – 187 с.
7. Тарандушка Л.А. Технологія моніторингу показників якості технічного обслуговування та ремонту автомобілів. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2014. №1(71). С.116-122.
8. Leopoldo Pedro Guimarães Filho; Vilson Menegon Bristot; Sara Pizzolo Silva; Edison Uggioni; Vilmar Menegon Bristot (2019) The Analysis of the Quality Indicator of the Paint Process of a Metalmechanical Industry. *International Journal for Innovation Education and Research*, 7(4), p.342-358. DOI:10.31686/ijer.Vol7.Iss4.1421.
9. Форнальчик Є. Ю. Основи технічного сервісу транспортних засобів. Львівська політехніка, 2017. 324 с.

10. Maximilian Kuhnhenh, Max F. Luh, Tórstein V. Joensen, Mads Reck, Ilia V. Roisman, Cameron Tropea Modelling of the breakup process of viscous fluids by a high-speed rotary atomizer. *Experiments in Fluids*, Volume 59, article number 117. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-018-2573-5>

References

1. Tarandushka, L.A. (2025). *Orhanizatsiia provedennia obov'iazkovoho tekhnichnoho kontroliu avtotransportnykh zasobiv*. Cherkasy: Vertykal', vydavets' Kandych S.H. [in Ukrainian].
2. Hnatov, A.V., & Arhun, Sh.V. (2015). Suchasni tekhnologii zovnishnoho mahitnoimpulsnoho kuzovnoho remontu avtomobiliv. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu*, (4), 103–108 [in Ukrainian].
3. Kipriyanov, F.A., Shushkov, R.A., & Mikhailov, A.S. (2020). Quality research of paintwork of Volkswagen Tuareg car body elements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 832(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/832/1/012008>
4. Tarandushka, L.A. (2020). Pobudova funktsional'noi modeli avtoservisnoho pidpriemstva. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu*, 1(46), 333–340 [in Ukrainian].
5. Molina, J., Solanes, J.E., Arnal, L., & Tornero, J. (2017). On the detection of defects on specular car body surfaces. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 44, 263–278. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.04.009>
6. Tryhub, O.A. (2021). *Tekhnolohichne obladnannia dlia obsluhovuvannia ta remontu avtomobiliv: navch. posib*. Cherkasy: ChDTU [in Ukrainian].
7. Tarandushka, L.A. (2014). Tekhnolohiia monitorynhu pokaznykiv yakosti tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu avtomobiliv. *Visnyk Chernihivs'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya "Tekhnichni nauky"*, 1(71), 116–122 [in Ukrainian].
8. Guimarães Filho, L.P., Bristot, V.M., Silva, S.P., Uggioni, E., & Bristot, V.M. (2019). The analysis of the quality indicator of the paint process of a metalmechanical industry. *International Journal for Innovation Education and Research*, 7(4), 342–358. <https://doi.org/10.31686/ijer.Vol7.Iss4.1421>
9. Fornal'chyk, Ye.Yu. (2017). *Osnovy tekhnichnoho servisu transportnykh zasobiv*. Lviv: Lvivs'ka politekhnika [in Ukrainian].
10. Kuhnhenh, M., Luh, M.F., Joensen, T.V., Reck, M., Roisman, I.V., & Tropea, C. (2018). Modelling of the breakup process of viscous fluids by a high-speed rotary atomizer. *Experiments in Fluids*, 59, Article 117. <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2573-5>.

Liudmyla Tarandushka, Prof., DSc., **Ivan Tarandushka**

Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

Development of a Paint Application System Morphological Matrix for Enable Prediction of Restoration Paint Coating Quality on Car Body Parts

Increasing the efficiency of the bodywork service by ensuring the necessary conditions for obtaining high-quality paintwork is an important component of car service systems that provide bodywork restoration services. Improving the quality of the paintwork of repaired car body parts leads to a reduction in the costs of car service systems and an increase in their operating efficiency.

As a result of the analysis of technologies for restoring the paintwork of car body parts, a scheme of the surface preparation process for painting was developed, consisting of the technological process operations for restoring the paintwork. If we assume that all preparatory operations for applying the paintwork are performed qualitatively, then it is possible to describe the paintwork application system by determining its significant parameters and, based on the morphological analysis method, develop a morphological matrix describing this system. The morphological matrix of the paintwork application system consists of morphological structures and morphological features by which this system is described. The gradation of quantitative variants of morphological features was determined using the method of quantitative assessments. The combination of individual variants of all morphological features forms a new morphological structure of the paint and varnish application system. That is, the morphological matrix allows describing all existing, as well as form new, more effective structures of paint and varnish application systems.

This matrix is used to predict the quality of the paint and varnish coating on body parts to be repaired, taking into account the initial parameters of the paint and varnish application system. To determine the most significant morphological features of the system, it is necessary to conduct an examination of at least 20 systems of different morphological structure and use the Farrar-Glober algorithm to determine independent parameters and select the most significant ones among them.

paint coating, restoration, morphological matrix, quality

Одержано (Received) 11.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 02.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025

УДК 656.01:658.7:656.131

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.371-381](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.371-381)

С. Ю. Тищенко, В. В. Аулін, проф., д-р техн. наук,

А. В. Гриньків, ст. дослідник, канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: AulinVV@gmail.com*

Виявлення типових відмов елементів автомобілів групи Renault та обґрунтування вибору запасних частин

В статті розглядаються методи виявлення і дослідження відмов елементів (вузлів деталей, систем, агрегатів) автомобілів. Основні проблеми процесу ефективності експлуатації легкових автомобілів безпосередньо залежить від цілісного підходу до реалізації заходів матеріально-технічного забезпечення, включаючи планування обсягів постачання та управління запасами запасних частин на підприємствах, що здійснюють технічне обслуговування та поточний ремонт, починаючи з дистриб'юторських мереж і завершуючи дилерськими СТО. Проведено аналіз останніх досліджень щодо ключових умов стабільного функціонування автомобільних сервісних систем (таких як СТО, логістичні центри з постачання запчастин і склади автомобільних комплектуючих) та розроблено ряд заходів, спрямованих на підвищення їхньої ефективності. Це також потребує впровадження відповідних методів аналізу, оцінювання та прогнозування їхньої поведінки в умовах динамічних систем обслуговування клієнтів. Визначено номенклатуру елементів, що лімітують працездатність (або «критичних» за працездатністю) автомобілів та ступінь впливу елементів автомобілів марки Renault. Виявлено рівень значущості впливу відмов елементів автомобілів на рівень їхньої працездатності. Розроблено методику переходу елементів, що обмежують ресурс автомобілів в ранг запасних частин.

автомобіль, елемент, відмова, працездатність, рівень впливу, показник надійності, запчастина

Постановка проблеми. Процес експлуатації автомобілів та його ефективність тісно пов'язані з комплексним підходом до виконання різноманітних заходів матеріально-технічного забезпечення (МТЗ) [1,2], в т.ч. планування обсягу постачань та управління запасом запасних частин (ЗЧ) на підприємствах технічного обслуговування і поточного ремонту автомобілів, починаючи від ланцюжка дистриб'юторської мережі та закінчуючи дилерською мережею станцій технічного обслуговування (СТО) [3].

Використовуючи досвід вітчизняного автомобільного ринку легкових автомобілів закордонного виробництва, а також враховуючі темпи його високого зростання, можливо виявити таку характерну рису як обмеженість номенклатури деталей, вузлів, систем і агрегатів. Вони є найбільш споживаними в частині загального обсягу ЗЧ, що витрачаються. Враховуються також елементи автомобілів які знаходяться гарантійному обслуговуванні. Своєчасне впровадження заходів щодо забезпечення необхідного рівня працездатності автомобілів може бути засноване на підході до оптимізації організації постачання та планування обсягу потреби та постачання ЗЧ [1] в умовах формування дистриб'юторської системи бренду Renault [1]. У зв'язку з цим у рамках експериментальних досліджень передбачається формування структури та змісту необхідної інформації, розробки методів її обробки і використання для вирішення завдань визначення потреби в елементах автомобілів бренду Renault з урахуванням їхнього просування в районі ділової активності функціонування дистриб'юторської системи постачання ЗЧ на СТО [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні та в майбутньому однією з ключових умов ефективного функціонування автомобільних сервісних систем – СТО, логістичні центри з постачання ЗЧ та склади автозапчастин – є постійна розробка та

впровадження заходів, спрямованих на підвищення їхньої ефективності [4]. Це, своєю чергою, вимагає використання сучасних методів аналізу, оцінки та прогнозування поведінки цих систем у динамічному середовищі автосервісного обслуговування клієнтів [4,5].

На українському ринку автосервісу та дистриб'юторських систем управління постачанням та запасами ЗЧ існує низка характерних проблем [6-9], серед яких:

- відсутність відкритості підприємств та їхніх фінансових даних, що ускладнює збір і аналіз необхідної інформації для розробки ефективних підходів до оптимізації роботи мереж СТО та систем дистрибуції;

- нестача дієвих методик для оцінки ефективності функціонування СТО з урахуванням як кількісних, так і якісних показників, а також прогнозування потреб у ЗЧ.

Ці виклики обумовлюють необхідність створення інноваційних принципів і методичних підходів, що дозволять підвищити ефективність роботи СТО [10-12]. Такі підходи мають враховувати часові чинники, поточну ринкову ситуацію та забезпечувати можливість оперативного планування потреб у ЗЧ, орієнтуючись на активність у регіонах, де діють мережі СТО та дистриб'юторські системи [13-15].

Сучасні економічні зміни змушують дистриб'юторські структури переглядати свою політику постачання ЗЧ на автосервісні підприємства з метою підтримання необхідного рівня працездатності транспортних засобів (ТЗ) [16-18].

Варто зазначити, що рівень запасів матеріальних ресурсів на СТО та етап попереднього постачання зазвичай базується на нормативних документах. Проте на практиці нормативний підхід не завжди є ефективним, натомість більш результативними є планувальні методики, засновані на статистичних і математичних підходах – зокрема, на теорії відновлення та теорії масового обслуговування [19-20].

Вирішення даної задачі передбачає необхідність наявності експериментальної складової досліджень [11], націлених на:

- застосування статистичного підходу при отриманні статистичних характеристик надійності елементів (вузлів, систем, агрегатів) автомобілів у процесі експлуатації, абсолютних та питомих витрат на ЗЧ при відновленні їхньої працездатності;

- визначення закономірностей розподілу відмов елементів (запасних частин) та формування провідних функцій потоків відмов;

- виявлення рівня значущості впливу відмов елементів автомобілів на рівень їхньої працездатності;

- виділення номенклатури елементів (ЗЧ), що лімітують працездатність легкових автомобілів.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є розробка методики виявлення номенклатури елементів автомобілів марки Renault, які можна використати в дистриб'юторській та дилерській системах постачання запчастин на станціях їхнього технічного обслуговування.

Викладення основного матеріалу. Дослідженню підлягали автомобілі марки Renault, що обслуговуються на дилерських центрах та які експлуатувалися в умовах інтенсивного заміського та міського руху. Термін збору експериментальних даних становив 2 роки в період з 2022 по 2024 роки. У ході експерименту було розглянуто 500 автомобілів бренду Renault такі як: Renault Dokker, Renault Express, Renault Master

Була досліджена структура елементів (вузлів, систем, агрегатів) автомобілів Renault та введенні їх позначення. Ці елементи підлягали оцінці експлуатаційної надійності. Номенклатуру елементів марки Renault формували на основі аналізу умов

та інтенсивності експлуатації, а також несправностей та потоку відмов, при використанні інформаційної бази даних. Відмови та несправності були класифіковані на основі основних положень, з метою проведення якісної оцінки надійності вузлів, систем та агрегатів автомобілів. Класифікаційні ознаки врахували специфіку відмов та несправностей. Їх приклади наведені в таблиці 1.

Зауважимо, що поділ отриманих у ході спостереження даних (табл.1) здійснено за організаційною і локальною ознаками та з урахуванням досвіду і кваліфікації персоналу СТО. Наведено приклади регулярного контролю технічного стану автомобілів, що враховують напрацювання вузлів, систем та агрегатів в реальних умовах їхньої експлуатації. Беруться до уваги обсяги проведених технічних робіт та перелік виявлених, зареєстрованих відмов і несправностей.

Таблиця 1 - Класифікація відмов та несправностей автомобілів марки Renault

1. Вплив на працездатність:	1.1. Відмова елемента викликає відмову автомобіля
	1.2. Відмова елемента не викликає відмови(несправності) автомобіля
2. За джерелом та причинами виникнення відмов автомобіля:	2.1. Виробничі недосконалості або порушення технології виготовлення системи зчеплення
	2.2. Експлуатаційні (порушення правил технічної експлуатації, кваліфікація персоналу)
	2.3. Деградаційні, зумовлені природними процесами старіння гумових матеріалів
3. За характером зміни параметра технічного стану	3.1. Поступові відмови - плавні та монотонні зміни технічного стану амортизаторів
	3.2. Раптові відмови - стрибкоподібні непрогнозовані зміни технічного стану системи турбонаддуву двигуна
4. За значимістю впливу на працездатність:	4.1. Критична відмова - відмова, що впливає на зниження дорожньої та екологічної безпеки, що призводить до припинення транспортного процесу та вимагає для його усунення заміни базових деталей системи зчеплення та стартеру
	4.2. Істотна лінійна відмова - викликана погіршенням техніко-експлуатаційних властивостей, що призводить до припинення та (або) порушення розпочатого транспортного процесу елементів ходової частини
	4.3. Несуттєва відмова - інші відхилення технічного стану від вимог нормативно-технічної документації(елементів ходової частини), що не порушують транспортний процес

Джерело: розроблено авторами

Зазначимо, що умови проведених випробувань належать до класу випробувань, що не підлягають фіксації режиму роботи. З урахуванням розроблених підходів вони мають такий характер:

- інформаційний, тобто коли відомості спрямовані на велику кількість споживачів в т.ч. клієнтів та співробітників СТО;
- рекомендаційний, який містить певні пропозиції (іноді комерційні), направлені на адресу заводу-виробника, або споживачів.

Визначається перелік елементів автомобілів, що лімітують працездатність, виявляються причини виникнення відмов та несправностей. Також формуються рекомендації термінів та специфікації робіт щодо підтримки справного технічного стану автомобілів. При проведенні експериментальних досліджень зі збору та обробки статистичної інформації про експлуатаційну надійність відібраних елементів було отримано оціночні показники.

В подальшому розгляді та вирішенні поставлених завдань, розв'язувались питання оптимізації та прогнозування потреби в елементах автомобілів з урахуванням їхнього просування у районі ділової активності функціонування дистриб'юторських та дилерських систем постачання елементів як запасних частин(ЗЧ) у дилерську мережу СТО. Структура сукупності елементів представлена в таблицях 2-4.

Таблиця 2 - Структура та позначення елементів автомобілів Renault Dokker

п/п	Найменування елементів	Індекс елементів, E1
1	Втулки переднього стабілізатора	E1
2	Стійки переднього стабілізатора	E2
3	Опора двигуна права	E3
4	Важелі передньої підвіски	E4
5	Сайлентблоки задньої балки	E5
6	Гальмівні диски	E6
7	Наконечники рулевих тяг	E7
8	Рульова рейка	E8
9	Передні амортизатори	E9
10	Опорні підшипники	E 10
11	Задні амортизатори	E 11
12	Зчеплення КПП	E 12
13	Стартер	E13
14	Ремінь ГРМ з роликами	E14
15	Ремінь полікліновий з роликами	E15
16	Помпа	E16
17	Турбокомпресор	E17
18	Калібрування і ремонт паливних форсунок	E18

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 - Структура та позначення елементів автомобілів Renault Express

п/п	Найменування елементів	Індекс елементів, E1
1	Втулки переднього стабілізатора	E1
2	Стійки переднього стабілізатора	E2
3	Опора двигуна права	E3
4	Важелі передньої підвіски	E4
5	Сайлентблоки задньої балки	E5
6	Гальмівні диски	E6
7	Наконечники рулевих тяг	E7
8	Передні ступичні підшипники	E8
9	Передні амортизатори	E9
10	Опорні підшипники	E 10
11	Задні амортизатори	E 11
12	Зчеплення КПП	E 12
13	Задні гальмівні барабани з колодками	E13
14	Ремінь ГРМ з роликами	E14
15	Ремінь полікліновий з роликами	E15
16	Помпа	E16
17	Турбокомпресор	E17
18	Калібрування і ремонт паливних форсунок	E18

Джерело: розроблено авторами

Виявлення елементів автомобілів, що лімітують їх працездатність, формували внаслідок комплексного врахування наступних критеріїв:

- наявність типових відмов, що визначають ресурс, та їх частота на одиницю пробігу автомобіля;
- рівень впливу кожної відмови на загальну працездатність транспортного засобу;
- співвідношення між витратами на заміну певного елемента і середнім напрацюванням до відмови для відповідного типу поломок.

Таблиця 4 - Структура та позначення елементів автомобілів Renault Master

п/п	Найменування елементів	Індекс елементів, Е1
1	Втулки переднього стабілізатора	Е1
2	Стійки переднього стабілізатора	Е2
3	Маточина колісна передня	Е3
4	Шарова опора переднього важеля	Е4
5	Ресори заднього моста	Е5
6	Гальмівні диски передні	Е6
7	Наконечники рулевих тяг	Е7
8	Рульова рейка	Е8
9	Передні амортизатори	Е9
10	Опорні підшипники	Е 10
11	Задні амортизатори	Е 11
12	Зчеплення КПП	Е 12
13	Стартер	Е13
14	Ланцюг ГРМ	Е14
15	Ремінь полікліновий з роликами	Е15
16	Помпа	Е16

Джерело: розроблено авторами

Для отримання найбільш правдоподібних результатів дослідження вирішено збирати реальні дані про діяльність дилерської мережі СТО, на яких обслуговується бренд Renault. В результаті збору статистичних даних та формування бази даних про відмови, що у процесі експлуатації, отримані основні статистичні показники: середні напрацювання на відмову; коефіцієнт варіації; дисперсія та ін. Це дозволило виявити, оцінити та класифікувати відмови автомобілів даної марки. Також буди отримані показники їхньої експлуатаційної надійності, та визначені інтегральні та диференціальні функції напрацювань на відмову.

Експлуатаційні показники автомобілів за даними діяльності дилерської мережі СТО оцінювали методом послідовних переваг.

За показниками надійності була розроблена методика виявлення критичних елементів автомобілів, тих що лімітують їх працездатний стан. При визначенні номенклатури запчастин, які слід замовити *визначали ступінь впливу* типових відмов на загальну працездатність автомобіля. Проаналізовані дані про класифікацію відмов та дані з досвіду обслуговування та експлуатації автомобілів, а також ремонту їхніх вузлів, систем та агрегатів (елементів).

Виявлено наступні типові ступені впливу на можливість подальшої експлуатації автомобілів:

– ступінь Q_1 типового впливу елемента, відмова якого призводить до повної неможливості експлуатації автомобіля, тобто транспортний засіб переходить у граничний або повністю несправний стан;

– ступінь Q_2 типового впливу елемента, при відмові якого суттєво погіршується технічний стан автомобіля, виникає необхідність у негайному ремонті, і автомобіль вважається несправним;

– ступінь Q_3 типового впливу елемента, відмова якого спричиняє незначне відхилення технічного стану автомобіля від нормативних показників. Несправність потребує усунення, ремонт є тривалим, а сама відмова класифікується як незначна.

Визначено ступінь впливу по кожному досліджуваному елементу автомобілів марки Renault за сумарним значенням оцінки. При цьому враховували вартість елемента як запасної частини, середнє напрацювання на відмову і питомі витрати на відмову. Отримані результати по автомобілям Renault Dokker, Renault Express, Renault Master занесені до таблиць 5-7.

Таблиця 5 – Рівень типових впливів елементів на працездатність автомобіля Renault Dokker

№ п/п	Найменування елемента	Позначення елемента	Рівень впливу на працездатність Q_i/Ω_{ij} оціночний показник			Сумарне значення оцінки $\Omega_{\Sigma i}$	Вартість запасної частини C, у.о.	Середнє напруження на відмову $\bar{l}$, т.км.	Питомі витрати на запасні частини Si
			Q1	Q2	Q3				
			$\Omega_{i1} = 10$	$\Omega_{i21} = 6$	$\Omega_{i31} = 3$				
1.	Втулки переднього стабілізатора	E ₁			+	3	5	75	0,066
2	Стійки переднього стабілізатора	E ₂			+	3	20	75	0,266
3	Опора двигуна права	E ₃		+	+	9	90	80	1,125
4	Важелі передньої підвіски	E ₄		+	+	9	80	75	1,066
5	Сайлентблоки задньої балки	E ₅		+	+	9	15	100	0,15
6	Гальмівні диски передні	E ₆	+	+		16	55	90	0,61
7	Наконечники рульових тяг	E ₇	+	+	+	19	15	50	0,30
8	Рульова рейка	E ₈	+	+	+	19	1000	180	5,5
9	Передні амортизатори	E ₉		+	+	9	150	80	1,875
10	Опорні підшипники	E ₁₀		+	+	9	60	80	0,75
11	Задні амортизатори	E ₁₁		+	+	9	100	100	1
12	Зчеплення КПП	E ₁₂	+			10	130	150	0,86
13	Стартер	E ₁₃	+			10	90	200	0,45
14	Ремінь ГРМ з роликками	E ₁₄	+			10	90	120	0,75
15	Ремінь полікліновий з роликками	E ₁₅	+			10	60	120	0,5
16	Помпа	E ₁₆	+	+		16	55	120	0,45
17	Турбокомпресор	E ₁₇	+	+		16	450	250	1,8
18	Калібрування і ремонт паливних форсунок	E ₁₈	+	+	+	19	400	250	1,6

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 6 – Рівень типових впливів елементів на працездатність автомобіля Renault Express

№ п/п	Найменування елемента	Позначення елемента	Рівень впливу на працездатність Q_i/Ω_{ij} оціночний показник			Сумарне значення оцінки $\Omega_{\Sigma i}$	Вартість запасної частини C, у.о.	Середнє напруження на відмову $\bar{l}$, т.км.	Питомі витрати на запасні частини Si
			Q1	Q2	Q3				
			$\Omega_{i1} = 10$	$\Omega_{i21} = 6$	$\Omega_{i31} = 3$				
1.	Втулки переднього стабілізатора	E ₁			+	3	8	90	0,08
2	Сійки переднього стабілізатора	E ₂			+	3	30	90	0,33
3	Опора двигуна права	E ₃		+	+	9	120	130	0,92
4	Важелі передньої підвіски	E ₄		+	+	9	100	90	1,11
5	Сайлентблоки задньої балки	E ₅		+	+	9	25	120	0,208
6	Гальмівні диски передні	E ₆	+	+		16	70	100	0,7
7	Наконечники рульових тяг	E ₇		+	+	9	25	70	0,35
8	Передні ступичні підшипники	E ₈	+	+		16	80	150	0,53
9	Передні амортизатори	E ₉		+	+	9	170	120	1,41
10	Опорні підшипники	E ₁₀		+	+	9	70	120	0,58
11	Задні амортизатори	E ₁₁		+	+	9	110	120	0,91
12	Зчеплення КПП	E ₁₂	+			10	130	150	0,86
13	Задні гальмівні барабани з колодками	E ₁₃		+	+	9	150	150	1
14	Ремінь ГРМ з роликами	E ₁₄	+			10	110	120	0,91
15	Ремінь полікліновий з роликами	E ₁₅	+			10	80	120	0,66
16	Помпа	E ₁₆	+	+		16	75	120	0,625
17	Турбокомпресор	E ₁₇	+	+		16	500	300	1,66
18	Калібрування і ремонт паливних форсунок	E ₁₈	+	+	+	19	440	300	1,46

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 7 – Рівень типових впливів елементів на працездатність автомобіля Renault Master

№ п/п	Найменування елемента	Позначення елемента	Рівень впливу на працездатність Q_i/Ω_{ij} оціночний показник			Сумарне значення оцінки $\Omega_{\Sigma i}$	Вартість запасної частини C, у.о.	Середнє напрацювання на витрати $\bar{l}$, т.км.	витрати на запасні Si
			Q1	Q2	Q3				
			$\Omega_{i1} = 10$	$\Omega_{i21} = 6$	$\Omega_{i31} = 3$				
1.	Втулки переднього стабілізатора	E ₁			+	3	5	70	0,07
2	Стійки переднього стабілізатора	E ₂			+	3	20	70	0,28
3	Маточина колісна передня	E ₃	+	+		16	150	150	1
4	Шарова опора переднього важеля	E ₄		+	+	9	90	80	1,125
5	Ресори заднього моста	E ₅	+	+		16	200	150	1,33
6	Гальмівні диски передні	E ₆	+	+		16	60	100	0,6
7	Наконечники рулевих тяг	E ₇		+	+	9	20	60	0,33
8	Рульова рейка	E ₈	+	+	+	19	1000	250	4
9	Передні амортизатори	E ₉		+	+	9	160	120	1,33
10	Опорні підшипники	E ₁₀		+	+	9	60	120	0,5
11	Задні амортизатори	E ₁₁		+	+	9	120	120	1
12	Зчеплення КПП	E ₁₂	+			10	150	160	0,93
13	Стартер	E ₁₃	+			10	100	200	0,5
14	Ланцюг ГРМ	E ₁₄	+	+		16	150	200	0,75
15	Ремінь полікліновий з роликami	E ₁₅	+			10	70	100	0,7
16	Помпа	E ₁₆	+	+		16	60	250	0,24

Джерело: розроблено авторами

Аналіз даних для автомобілів Renault Dokker (табл.5) свідчить, що найбільш відповідальними є елементи E12-E15, які мають типовий ступінь впливу Q_1 і приводять до непрацездатності автомобіля. Елементи E6, E16, E17 знаходяться у зоні більшого ризику, оскільки вони мають як типовий ступінь впливу Q_1 , так і Q_2 . Всі типові ступені впливу мають елементи E7, E8, E18. В зоні меншого ризику знаходяться елементи E3-E5, E9-E11, оскільки вони мають типові ступені впливу Q_2 і Q_3 на працездатний стан автомобілів Renault Dokker.

Аналіз даних для автомобілів Renault Express (табл.6) визначив, що найбільш відповідальними є елементи E12, E14-E15, які мають типовий ступінь впливу Q_1 і призводить до непрацездатності автомобіля. Елементи E6, E8, E16, E17 знаходяться у зоні більшого ризику, оскільки вони мають як типовий ступінь впливу Q_1 , так і Q_2 . Всі типові ступені впливу має елемент E18. В зоні меншого ризику знаходяться елементи E3-E5, E7, E9-E11, E13, оскільки вони мають типові ступені впливу Q_2 і Q_3 на працездатний стан автомобілів Renault Express.

Аналіз даних для автомобілів Renault Master (табл.7) показав, що найбільш відповідальними є елементи E12, E13, E15, які мають типовий ступінь впливу Q_1 , що призводить до непрацездатності автомобіля. Елементи E3, E5, E6, E14, E16 знаходяться у

зоні більшого ризику, оскільки вони мають як типовий ступінь впливу Q_1 , так і Q_2 . Всі типові ступені впливу має елемент Е8. В зоні меншого ризику знаходяться елементи Е4, Е7, Е9-Е11, оскільки вони мають ступінь типового впливу Q_2 і Q_3 на працездатний стан автомобілів Renault Master.

Слід зазначити, що розглянуті елементи необхідно замовляти як запасні частини для обслуговування даних автомобілів в розрізі дистриб'юторської та дилерської системою постачання запчастин на станції їх технічного обслуговування, а також визначити значимість та ступінь впливу на працездатність автомобілів цих ЗЧ, щоб сформулювати ефективний порядок замовлення ЗЧ.

Проведеними дослідженнями виявлено, що для автомобілів групи Renault необхідно замовляти негайно ЗЧ, при виходу з ладу яких експлуатація автомобілів неможлива: зчеплення КПП, стартер, ремінь ГРМ з роликами, ремінь полікліновий з роликами.

Якщо при виходу з ладу елементів відбувається істотне зниження технічного стану автомобілів та виникає необхідність проведення ремонту, то можливо спланувати заздалегідь замовлення помпи і турбокомпресора.

Під проведення більш великих ремонтів, щоб зменшити час простою автомобіля, вихід з ладу, коли відбувається незначне відхилення технічного стану легкових автомобілів від еталонних значень, слід замовляти наступні деталі: втулки переднього стабілізатора, стійки переднього стабілізатора.

Елементи, які мають декілька типових ступенів впливу на працездатність автомобіля: передні та задні амортизатори, важелі передньої підвіски, наконечники рульових тяг, передні гальмівні диски, рульова рейка, сайлентблоки задньої балки, опорні підшипники стійок амортизаторів, калібрування і ремонт паливних форсунок. Замовлення їх, як запчастин треба спланувати на основі переважності типових ступенів їх впливу на технічний стан автомобіля групи Renault.

Висновки

1. Досліджено характерні відмови та несправності автомобілів марки Renault: Renault Dokker, Renault Express, Renault Master. Проведено їх класифікацію за джерелами та причинами виникнення, за характером зміни переходів технічного стану та за значимістю впливу на працездатність автомобіля.

2. При проведенні експериментальних досліджень зі збору і обробки статистичної інформації про рівень експлуатаційної надійності вузлів, систем і агрегатів була визначена номенклатура елементів для кожного із автомобілів.

3. Розроблена методика виявлення ресурсовизначальних елементів автомобілів марки Renault на основі ступенів типового впливу на технічний стан і показники експлуатаційної надійності. На основі результатів досліджень наведено обґрунтування елементів, які можуть розглядатися як запасні частини і які потребують різного рівня замовлення.

Список літератури

1. Аулін В. В., Гриньків А. В., Кузик О. В., Тertiця О. М., Байцан В. Г. Система сервісного обслуговування транспортної та сільськогосподарської техніки дилерським центром в агропромисловому виробництві. Крамаровські читання : зб. тез доп. XI Міжнар. наук.-техн. конф., 22–23 лют. 2024 р., м. Київ. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2024. С. 108–110.
2. Аулін В. В., Гриньків А. В., Сергійчук А. А., Ляшук О. Л. Використання ймовірно-логічного діагностування технічного стану машин в розробці системи технічного обслуговування і ремонту. Крамаровські читання : зб. тез доп. XI Міжнар. наук.-техн. конф., 22–23 лют. 2024 р., м. Київ. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2024. С. 103–105.
3. Аулін В. В. та ін. Оптимальний комплекс операцій технічного обслуговування і ремонту для підвищення надійності вузлів, систем та агрегатів мобільних машин. Центральноукр. наук. вісн. Техн. науки. 2023. Вип. 8(39)_II. С. 175–189.
4. Аулін В. В. та ін. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2020. № 22. С. 162–174.

5. Poliakov A., Antonyuk O., Ratsyborynskiy V. Identification of improvement ways of estimation method for nomenclature and quantity of spare parts. *Tehnomus*. 2013. No. 20. P. 34–39.
6. Поляков А. П., Антонюк О. П. Аналіз факторів, які впливають на формування номенклатури та кількості запасних частин автотранспортного підприємства. *Вісн. Сх. укр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. 2011. № 6(160). С. 139–143.
7. Поляков А. П., Антонюк О. П., Галушак Д. О. Організація забезпечення запасними частинами автотранспортних підприємств. *Наук. нотатки*. 2012. Вип. 36. С. 238–240.
8. Поляков А. П. та ін. Метод формування необхідної кількості запасних частин для ремонту засобів транспорту. *Наук. пр. Вінниц. нац. техн. ун-ту*. 2012. № 2.
9. Антонюк О. П. та ін. Обґрунтування вихідних принципів розробки методу формування номенклатури та кількості запасних частин. *Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. Сер. Техн. науки*. 2014. № 2(69). С. 10–15.
10. Біліченко В. В., Антонюк О. П. Обґрунтування критеріїв оцінки ефективності вибору запасних частин, що зберігаються на складі АТП. *Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. Сер. Техн. науки*. 2016. № 2(77). С. 56–61.
11. Антонюк О. П. Аналіз методів визначення номенклатурних груп запасних частин. *Вісн. СевНТУ. Сер. Машиноприладобудування та транспорт*. 2013. № 142. С. 181–183.
12. Біліченко В. В. та ін. Характеристика концепції щодо впровадження раціонального забезпечення регіонального вантажного АТП запасними частинами. *Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. Сер. Техн. науки*. 2018. № 2(82). С. 21–24.
13. Біліченко В. В. та ін. Про раціональний підхід до забезпечення запасними частинами вантажних АТП регіону. *Наук. нотатки*. 2018. Вип. 62. С. 29–35.
14. Кашканов А. А., Москалюк М. Л. Методи обґрунтування запасів запасних частин у системі управління транспортним процесом. *Вісн. машинобуд. та трансп.* 2024. № 19(1). С. 68–74.
15. Антонюк О. П. Покращення процесу забезпечення запасними частинами рухомого складу автотранспортного підприємства : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20. Житомир, 2021. 24 с.
16. Bacchetti A., Saccani N. Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*. 2012. Vol. 40, No. 6. P. 722–737.
17. Bondarenko E. et al. Improving the Efficiency of Vehicle Operation by Defining the Organizational and Methodological Parameters of the Spare Parts Incoming Inspection System. In: Guda A. (ed.) *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham : Springer, 2023. Vol. 509.
18. Strelnikov V. P., Strelnikov P. V. Defining the nomenclature of the spare parts sets and calculating the number of single sets of spare parts. *Math. machines and systems*. 2022. No. 2. P. 83–90.
19. Коробочка О. М. та ін. Моделювання складських запасів на станціях технічного обслуговування автомобілів. *Математичне моделювання*. 2023. № 2(49). С. 133–141.
20. TecDoc Catalogue by TecAlliance. URL: <https://web.tecalliance.net/uk/home> (дата звернення: 25.04.2025).

References

1. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., Kuzyk, O.V., Tertytsia, O.M., Baitsan, V.H. (2024). Systema servisnoho obsluhovuvannia transportnoi ta sil's'kohospodars'koi tekhniki dylers'kym tsentrom v ahropromyslovomu vyrobnytstvi. *Kramarovski chytannia: zb. tez dop. KhI Mizhnar. nauk.-tekhn. konf.*, Kyiv, 22–23 Liut. 2024 (pp. 108–110). Kyiv: Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., Serhiichuk, A.A., Liashuk, O.L. (2024). Vykorystannia imovirnisno-lohichnoho diahnostuvannia tekhnichnoho stanu mashyn v rozrobtsi systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu. *Kramarovski chytannia: zb. tez dop. KhI Mizhnar. nauk.-tekhn. konf.*, Kyiv, 22–23 Liut. 2024 (pp. 103–105). Kyiv: Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V., et al. (2023). Optymal'nyi kompleks operatsii tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu dlia pidvyshchennia nadiinosti vuzliv, system ta ahrehativ mobil'nykh mashyn. *Tsentral'noukrains'kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39)_II, 175–189 [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V., et al. (2020). Printsypy pobudovy ta funktsionuvannia kiberfizychnoi systemy tekhnichnoho servisu avtotransportnoi ta mobil'noi sil's'kohospodars'koi tekhniki. *Tekhnichniy servic ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, (22), 162–174 [in Ukrainian].
5. Poliakov, A., Antonyuk, O., & Ratsyborynskiy, V. (2013). Identification of improvement ways of estimation method for nomenclature and quantity of spare parts. *Tehnomus*, (20), 34–39.
6. Poliakov, A.P., & Antonyuk, O.P. (2011). Analiz faktoriv, yaki vplyvaiut' na formuvannia nomenklatury ta kil'kosti zapasnykh chastyn avtotransportnoho pidpriemstva. *Visnyk Shkhidno-Ukrains'koho nats. un-tu im. V. Dalia*, (6(160)), 139–143 [in Ukrainian].
7. Poliakov, A.P., Antonyuk, O.P., & Halushchak, D.O. (2012). Orhanizatsiia zabezpechennia zapasnymy chastynamy avtotransportnykh pidpriemstv. *Naukovi notatky*, (36), 238–240 [in Ukrainian].
8. Poliakov, A.P., et al. (2012). Metod formuvannia neobkhidnoi kil'kosti zapasnykh chastyn dlia remontu zasobiv transportu. *Naukovi pratsi Vinnyts'koho nats. tekhn. un-tu*, (2) [in Ukrainian].

9. Antonyuk, O.P., et al. (2014). Obhruntuvannia vykhidnykh printsypiv rozrobky metodu formuvannia nomenklatury ta kil'kosti zapasnykh chastyn. *Visnyk Zhytomyrs'koho derzh. tekhnol. un-tu. Ser. Tekhn. nauky*, (2(69)), 10–15 [in Ukrainian].
10. Bilichenko, V.V., & Antonyuk, O.P. (2016). Obhruntuvannia kryteriiv otsinky efektyvnosti vyboru zapasnykh chastyn, shcho zberihaiut'sia na skladi ATP. *Visnyk Zhytomyrs'koho derzh. tekhnol. un-tu. Ser. Tekhn. nauky*, (2(77)), 56–61 [in Ukrainian].
11. Antonyuk, O.P. (2013). Analiz metodiv vyznachennia nomenklaturnykh hrup zapasnykh chastyn. *Visnyk SevNTU. Ser. Mashynopryladobuduvannia ta transport*, (142), 181–183 [in Ukrainian].
12. Bilichenko, V.V., et al. (2018). Kharakterystyka kontseptsii shchodo vprovadzhennia ratsional'noho zabezpechennia rehional'noho vantazhnoho ATP zapasnymy chastynamy. *Visnyk Zhytomyrs'koho derzh. tekhnol. un-tu. Ser. Tekhn. nauky*, (2(82)), 21–24 [in Ukrainian].
13. Bilichenko, V.V., et al. (2018). Pro ratsional'nyi pidkhyd do zabezpechennia zapasnymy chastynamy vantazhnykh ATP rehionu. *Naukovi notatky*, (62), 29–35 [in Ukrainian].
14. Kashkanov, A.A., & Moskaliuk, M.L. (2024). Metody obhruntuvannia zapasiv zapasnykh chastyn u systemi upravlinnia transportnym protsesom. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 19(1), 68–74 [in Ukrainian].
15. Antonyuk, O.P. (2021). *Pokrashchennia protsesu zabezpechennia zapasnymy chastynamy rukhomoho skladu avtotransportnoho pidpriemstva: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.20. Zhytomyr* [in Ukrainian].
16. Bacchetti, A., & Saccani, N. (2012). Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*, 40(6), 722–737. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.06.008>
17. Bondarenko, E., et al. (2023). Improving the efficiency of vehicle operation by defining the organizational and methodological parameters of the spare parts incoming inspection system. In A. Guda (Ed.), *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 509). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30226-6_14
18. Strelnikov, V.P., & Strelnikov, P.V. (2022). Defining the nomenclature of the spare parts sets and calculating the number of single sets of spare parts. *Mathematical Machines and Systems*, (2), 83–90.
19. Korobochka, O.M., et al. (2023). Modeliuvannia skladsykh zapasiv na stantsiiakh tekhnichnoho obsluhovuvannia avtomobiliv. *Matematychni modeliuvannia*, 2(49), 133–141 [in Ukrainian].
20. TecAlliance. (n.d.). *TecDoc Catalogue by TecAlliance*. <https://web.tecalliance.net/uk/home> (accessed: April 25, 2025).

Serhii Tyshchenko, Viktor Aulin, Prof., Dr. Tech. Sci., **Andrii Hrynkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Identification of Typical Failures of Renault Group Vehicle Components and Justification of Spare Parts Selection

This article explores methods for detecting and studying failures of automotive components. The primary challenges related to the effectiveness of passenger vehicle operation are directly dependent on a holistic approach to the implementation of material and technical support measures. This includes the planning of supply volumes and management of spare parts inventory at enterprises involved in vehicle maintenance and repair. These enterprises range from distribution networks to dealer service stations.

An analysis of recent research on key conditions for the stable functioning of automotive service systems (such as service stations, logistics centers for spare parts supply, and automotive component warehouses) highlights the continuous development of measures aimed at improving their efficiency. This also requires the implementation of appropriate methods for analyzing, evaluating, and forecasting their behavior in dynamic customer service systems. The study identifies the nomenclature of components that limit the operability (or are "critical" for operability) of vehicles and assesses the degree of impact of components on the performance of Renault-branded vehicles.

The article also identifies the level of significance of failures in vehicle components and their impact on the overall performance of the vehicle. These findings are essential for the effective operation of service systems, ensuring that vehicles are maintained and repaired promptly, and that downtime is minimized. Further, the study suggests the application of predictive maintenance models and the introduction of advanced technologies in the automotive service industry to enhance both the operational efficiency and reliability of vehicles. By understanding the critical points of failure, automotive companies can reduce costs related to unscheduled repairs, improve customer satisfaction, and extend the operational lifespan of the vehicles they service.

In conclusion, the development of methods to predict, detect, and prevent failures of automotive components is crucial for the continued growth and competitiveness of service enterprises in the automotive sector. This research provides valuable insights into the factors that affect vehicle performance and offers practical recommendations for optimizing service systems, improving inventory management, and reducing the risks associated with component failures.

car, element, failure, performance, impact level, reliability indicator, spare part

Одержано (Received) 14.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 16.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.05.2025

УДК 656.13

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.382-393](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.382-393)

С. В. Харченко, В. Г. Байцан, Д. П. Косякевич, С. В. Лисенко, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: sv07091976@gmail.com

Підвищення ефективності використання парків транспортних та технологічних машин шляхом вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту

Стаття присвячена виявленню механізмів підвищення ефективності використання парків транспортних та технологічних машин шляхом удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту. Подано напрями вдосконалення організації виробництва з технічного обслуговування і ремонту парків транспортних та технологічних машин з метою підвищення ефективності їх використання.

Показано, що система машин складається зі створенням парків транспортних і технологічних машин. Серед їх характеристик виділено призначення машин, рівень їх продуктивності, вік та напрацювання за час експлуатації, країну-виробника. Розглянуто модульну структуру парків транспортних та технологічних машин за визначеними модульними ознаками. Запропонована структура дасть максимальну ефективність використання парку машин, їх виробничу і технічну експлуатацію. Визначені основні принципи формування парків машин.

Сформульовані основні шляхи удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту машин. Визначені переваги удосконаленої системи: підвищення ефективності та продуктивності, поліпшення надійнісних властивостей машин, підвищення безпеки та зниження ризиків, оптимізація планування та управління ресурсами. Особливу увагу приділено мінімізації витрат на технічне обслуговування і ремонт машин та його варіантам: профілактичні впливи та усунення пошкоджень після відмов елементів транспортних і технологічних машин. Визначено системи технічного обслуговування і ремонту для забезпечення справності та працездатності машин: планово-попереджувальна, заявна система, система на основі проведення технічного діагностування. Сформульовані системоутворюючі принципи парків машин. Запропоновані шляхи вирішення ряду проблем з підвищення ефективності використання парку транспортних і технологічних машин.

транспортна машина, технологічна машина, ефективність використання, парк машин, система технічного обслуговування і ремонту, експлуатація, технічна діагностика

Постановка проблеми. Підвищення ефективності та продуктивності транспортних і технологічних машин (ТМ) відіграє важливу роль у зміцненні економіки держави. Для досягнення значного приросту продуктивності праці в транспортній інфраструктурі країни та її регіонів необхідним є модернізація та оновлення машинного парку за рахунок впровадження сучасної високопродуктивної техніки. Водночас ефективність функціонування транспортних систем значною мірою визначається раціональним використанням уже наявної техніки.

У сучасних ринкових умовах виникає потреба в пошуку нових організаційних рішень у сфері технічної експлуатації й управління парками ТМ. Особливої актуальності набуває вдосконалення систем технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) [1-3].

Забезпечення надійної роботи й ефективної експлуатації машинного парку має свої специфічні особливості порівняно з обслуговуванням окремих одиниць техніки [4,5]. Однією з основних проблем є відсутність цілісного теоретичного підходу до управління працездатністю ТМ у масштабах парку, хоча існують вагомі передумови для його формування. До таких передумов можна віднести ґрунтовні дослідження у сфері

працездатності окремих машин, розвиток наукових засад технічної діагностики, а також впровадження сучасних методів інформаційно-аналітичного управління технічними системами [6,7].

В умовах ринку питання організації та раціонального використання ТМ стає особливо актуальним. Стадія активного розвитку технічної бази супроводжується масштабним будівництвом транспортної інфраструктури в регіонах і великих містах країни, що потребує залучення широкого спектра спеціалізованої техніки [2,8].

Формування ефективної системи машин і технічне оновлення транспортної галузі потребують розробки методологічного підґрунтя та практичних рішень для її реалізації.

Удосконалення системи ТОіР дозволяє скоротити витрати на експлуатацію та обслуговування транспортних та технологічних машин [10]. Регулярне їх технічне обслуговування (ТО) допомагає запобігти серйозним поломкам і знизити необхідність у дорогому ремонті вузлів, систем і агрегатів [37-39]. Це дозволяє заощадити кошти на придбання нової техніки та збільшити термін її служби. Парки ТМ можуть негативно впливати на навколишнє середовище через викиди шкідливих речовин та надмірне споживання ресурсів. Удосконалення системи ТОіР дозволяє більш ефективно контролювати та знижувати викиди, оптимізувати витрату палива та використання інших ресурсів, що сприяє більш екологічній експлуатації ТМ [40-43].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні парки транспортних і технологічних машин мають виражену різноманітність за технічними характеристиками. Вони об'єднують як застарілі моделі, що давно вичерпали свій ресурс, так і сучасні високопродуктивні машини, здебільшого іноземного виробництва. Така різноманітність типів і марок техніки ускладнює організацію технічного обслуговування і ремонтів [12-14].

Із розвитком засобів технічної діагностики (ТД) виникає потреба у трансформації системи ТОіР: замість планово-попереджувального підходу, орієнтованого на напрацювання, слід впроваджувати стратегію обслуговування за технічним станом вузлів та агрегатів ТМ [15,16; 45-48].

Економічні трансформації, що супроводжувалися зміною форм власності, зумовили суттєве скорочення темпів оновлення технічного парку, що, своєю чергою, призвело до його прискореного фізичного та морального старіння [30-35].

Упродовж останніх років спостерігається різке падіння обсягів виробництва ТМ в Україні. Зараз основна частка потреб у новій техніці покривається за рахунок імпорتنих поставок. Частка закордонної техніки в структурі ТМ за декілька років зросла з 16 % до 20 % [17,18,49].

Значний ступінь зношеності наявного машинного парку створює низку загроз, зокрема зниження експлуатаційної ефективності, зростання витрат на механізацію виробничих процесів, що негативно впливає на економічну продуктивність країни загалом [19,20,26].

У нинішніх умовах особливої важливості набуває оновлення машинного парку. Це включає планування обсягів закупівлі нової техніки та списання зношених одиниць. Такий підхід дозволить оптимізувати типорозмірну структуру парків і узгодити її з потребами виробництва. Одночасно слід активізувати власне виробництво ТМ у ключових напрямках для забезпечення технологічної та економічної безпеки держави й окремих її регіонів [21,22,50,51].

Останні роки характеризуються переходом від екстенсивної моделі розвитку парків до інтенсивної. Формуються нові ринкові структури, виникає конкуренція в сфері експлуатації ТМ [52,53]. Почалося виробництво новітніх багатофункціональних

машин із змінними робочими органами, розширюється співпраця з іноземними виробниками щодо спільної розробки і впровадження сучасної техніки [54-56].

Разом із тим, за оцінками експертів, дефіцит фінансових ресурсів обмежує можливості швидкого оновлення основних фондів, що гальмує модернізацію машинного парку [23-25].

Більшість техніки, що нині експлуатується, була закуплена за умов централізованих поставок, за наявності стабільного завантаження та великих обсягів робіт. В умовах відсутності централізованого управління процес оновлення машинного парку відбувається безсистемно, що сприяє зростанню частки імпортової техніки в структурі нових надходжень [27-29].

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення механізмів підвищення ефективності використання парку транспортних і технологічних машин шляхом удосконалення системи технічного обслуговування та ремонту.

Виклад основного матеріалу. Організація системи машин може здійснюватися шляхом формування парків транспортних і технологічних машин, при цьому слід враховувати обмежену номенклатуру техніки, що використовується для виконання різних видів робіт, а також необхідність технічного оновлення існуючого парку. Для реалізації такого підходу важливо досягти узгодженості між технологічними комплексами ТМ та запланованими обсягами виконання робіт. Інакше кажучи, слід забезпечити відповідність між потребами у механізованому виконанні робіт і наявними технічними засобами, а в разі нестачі – визначити необхідні обсяги виробництва або закупівлі нових машин.

Формована система машин повинна складатися з окремих парків ТМ, організованих за модульним принципом. Така структура передбачає врахування низки важливих характеристик, серед яких основними є: функціональне призначення техніки, її продуктивність, технічний стан (зокрема, вік та обсяг напруження), а також країна-виробник (табл. 1).

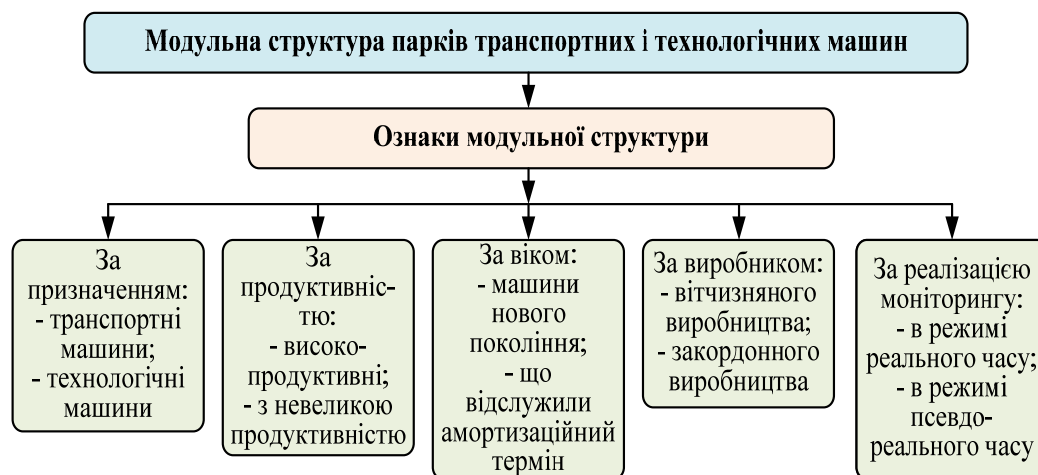


Рисунок 1 - Модульна структура парків транспортних і технологічних машин

Джерело: розроблено авторами

Модульна структура машинних парків є необхідною умовою для досягнення максимальної ефективності використання транспортних і технологічних машин, з урахуванням їх продуктивності та тривалості експлуатаційного ресурсу. Такий підхід дозволяє підвищити загальну ефективність виробничого та технічного використання машинного парку, що можливе лише за умови тісної інтеграції виробничих і технічних процесів експлуатації техніки.

Оптимізація використання ТМ у виробничих умовах може бути досягнута

шляхом подовження інтервалів між технічними обслуговуваннями, що базуються на результатах діагностичного контролю.

Формування ефективної системи машин для конкретного регіону або підприємства має спиратися на такі ключові принципи:

- мінімізація сумарних витрат, пов'язаних із простоєм машин через технічні несправності;

- удосконалення системи ТОіР, а також розвиток засобів технічного контролю та діагностики для забезпечення постійної готовності техніки до роботи;

- запровадження систем управління технічним станом на основі безперервного моніторингу, що включає кількісну оцінку та обробку інформаційних потоків, які відображають динаміку змін у структурі та технічному стані парку;

- підвищення конкурентоспроможності парків машин через розвиток лізингових механізмів, що дозволяють здійснювати технічне переоснащення та сервісне обслуговування на сучасному рівні.

У цьому контексті особлива увага повинна приділятися організації системи ТОіР та управлінню технічним станом машинного парку, з акцентом на техніку, термін експлуатації якої перевищує 10 років. Одним із перспективних інструментів модернізації машинної системи є лізинг, що забезпечує доступ до нових зразків техніки та сприяє оновленню основних фондів без надмірного навантаження на капітальні витрати підприємств.

Підвищення ефективності використання парку ТМ шляхом удосконалення системи ТОіР має кілька потенційних цілей та переваг, а саме:

1. Скорочення часу простою машин.
2. Зниження операційних витрат.
3. Підвищення довговічності ТМ.
4. Покращення безпеки та зниження ризиків.
5. Оптимізація планування та управління ресурсами.

Покращена система ТОіР може скоротити час, протягом якого машини перебувають поза експлуатацією через ремонт чи обслуговування. Це призводить до збільшення загальної продуктивності парку ТМ і скорочення втрат в результаті непрацездатності.

Удосконалена система ТОіР може сприяти більш ефективному використанню ресурсів, таких як запчастини (ЗЧ), матеріали та трудові ресурси. Це може призвести до скорочення операційних витрат, таких як витрати на ЗЧ, паливо та зарплати персоналу.

Регулярне та якісне ТОіР ТМ допомагають запобігти виникненню збоїв та пошкоджень. Це може призвести до підвищення довговічності ТМ, що у свою чергу знижує витрати на заміну деталей, вузлів і агрегатів та збільшує загальну ефективність використання.

Регулярне обслуговування та ремонт допомагають виявити та усунути потенційні проблеми безпеки на ранніх стадіях.

Удосконалена система ТОіР може надавати більш точну інформацію про стан ТЗ та їх потреби в обслуговуванні. Це допомагає оптимізувати планування ресурсів, таких як робоча сила, запасні частини, технологічне обладнання, та покращити управління процесами ТОіР.

У результаті вдосконалення системи ТОіР ТМ спостерігається підвищення ефективності та продуктивності парку ТМ, зниження операційних витрат, поліпшення надійнісних властивостей машин, підвищення безпеки та зниження ризиків, а також оптимізації планування та управління ресурсами.

Існуюча система ТОіР в нашій країні заснована на планово-попереджувальному

підході, який не враховує реального стану машин, специфічних умов експлуатації та ролі діагностики. В результаті відсутня можливість попереднього планування ремонтно-обслуговуючих заходів, та ТОіР проводяться тільки після явних відмов у роботі вузлів та елементів машин. Існуюча система попередньої оцінки технічного стану ТМ із застосуванням технічного діагностування не має чітких критеріїв визначення частоти діагностування та проведення технічних впливів, що враховують конкретні умови експлуатації. Крім того, діагностування проводиться одночасно для всіх вузлів, систем та агрегатів ТМ перед ТОіР.

У світлі вищевикладеного одним із головних стратегічних пріоритетів для підвищення ефективності парків ТМ є покращення систем забезпечення їх працездатності з урахуванням мінімізації витрат на ТОіР. На даний момент існують два основні варіанти систем технічного обслуговування та ремонту: профілактичні впливи та усунення пошкоджень після відмови елементів ТМ.

Донедавна єдиною офіційно діючою системою була система планово-попереджувального ремонту та технічного обслуговування машин. З аналізу робіт, присвячених поточному стану вдосконалення систем ТОіР ТМ, а також вивчення досвіду експлуатації парку ТМ впливає, що планово-попереджувальна система (ПЗС), яка застосовувалася в країні протягом тривалого часу, дозволила досягати економічного та раціонального використання ресурсів ТМ шляхом проведення регламентованих технічних впливів.

Внаслідок цього багаторазово перевищувався термін експлуатації машин, зазначений у амортизаційному періоді їхньої служби. Практика свідчить, що не рекомендується відмовлятися від регламентованих технічних впливів, але необхідно покращити індивідуалізацію процесу ТОіР кожного об'єкта. Це можна досягти шляхом збільшення інформативності процесу ТОіР ТМ.

В даний час застосовуються такі системи ТОіР для забезпечення справності та працездатності ТМ:

1. Планово-попереджувальна система ТОіР вирізняється відносною простотою впровадження, наявністю чітко визначених регламентів і можливістю завчасного планування обсягів ремонтних заходів. У межах цієї системи технічні втручання здійснюються у визначені терміни, що базуються на досягненні нормативного ресурсу роботи ТМ. Разом із тим, головним недоліком такого підходу є його формальний характер: він не враховує фактичного технічного стану машин та їхніх окремих вузлів, специфіку умов експлуатації, значення технічної діагностики, а також економічну доцільність проведення обслуговування чи ремонту.

2. Заявний принцип організації ТОіР передбачає виконання ремонтно-обслуговуючих операцій на підставі заявок користувачів або обслуговуючого персоналу, що ґрунтуються на виявленому технічному стані машин. Попри те, що цей підхід дозволяє враховувати реальні умови експлуатації, його суттєвим недоліком є неможливість ефективного планування ремонтних заходів. Це зумовлено ймовірними порушеннями графіків проведення робіт, ускладненнями в постачанні запчастин та загальним зниженням рівня технічної готовності парку. В умовах воєнного стану ситуація ускладнюється додатково через скорочення фактичного строку служби машин.

3. Система ТОіР на основі діагностування передбачає регулярне проведення технічного діагностування як окремого виду профілактичного впливу. Така система має значний потенціал щодо виявлення дефектів на ранніх стадіях та оптимізації витрат на ТОіР. Проте її недоліком є відсутність кількісно обґрунтованих регламентів для визначення доцільної періодичності діагностичних перевірок технічного стану ТМ, що знижує її практичну ефективність у серійному застосуванні.

Основні напрямки вдосконалення організації виробництва з ТОiP парку ТМ з метою підвищення ефективності їх використання відображені в табл. 1.

Таблиця 1 – Напрями вдосконалення організації виробництва з технічного обслуговування та ремонту парку транспортних засобів

№ п/п	Напрямок	Опис
1.	Оптимальна система машин	Формування оптимальної комбінації засобів механізації і транспортування для конкретного регіону чи муніципального утворення
2.	Раціональна система ТОiP	Розробка системи ТОiP, заснованої на дискретному контролі та діагностуванні технічного стану машин
3.	Система моніторингу технічного стану	Створення системи моніторингу, що дозволяє отримувати інформацію про технічний поточний стан парків машин та приймати обґрунтовані управлінські рішення
4.	Мінімізація простоїв машин	Оптимізація планування та проведення ремонтно-обслуговуючих робіт для скорочення часу на реалізацію операцій ТОiP
5.	Врахування специфіки умов експлуатації	Врахування особливостей умов експлуатації при розробці програм ТОiP
6.	Економічний підхід	Застосування економічних критеріїв при плануванні та оптимізації робіт з ТОiP
7.	Розвиток діагностичних можливостей	Розширення та вдосконалення системи технічної діагностики для більш точного визначення стану машин та запобігання відмовам
8.	Використання лізингу	Розширення використання такої форми послуг як лізинг техніки з метою оновлення та сервісного обслуговування машин

Джерело: розроблено авторами

При цьому основними заходами вдосконалені системи ТОiP є наступними:

- формування регіональної системи ТОiP ТМ, що становить оптимальну комбінацію механізації і транспортування для певного регіону;
- розробка раціональної системи ТОiP, заснованої на дискретному контролі та діагностуванні технічного стану транспортних та технологічних машин;
- створення системи моніторингу технічного стану парків машин, що дає змогу приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Формуючи системи ТОiP ТМ для конкретного регіону слід враховувати такі системоутворюючі принципи:

1. Мінімізація сумарних витрат на компенсацію простоїв машин та об'єктів будівництва.
2. Удосконалення системи ремонтно-обслуговуючих та контрольно-діагностичних технічних впливів для підтримки ТМ у постійній готовності до експлуатації.
3. Управління технічним станом існуючих парків ТМ на основі постійного моніторингу, використання кількісної оцінки та перетворення інформаційних потоків, що характеризують динаміку їх структурних параметрів.
4. Підвищення конкурентоспроможності парків ТМ шляхом розширення лізингу техніки з метою технічного переозброєння та обслуговування ТМ.

При підвищенні ефективності використання парку ТМ шляхом удосконалення можуть виникати ряд проблеми:

- недостатній облік фактичного стану ТМ та специфіки умов експлуатації під час виконання ТОіР;
- відсутність кількісних показників періодичності діагностування технічного стану ТМ та технічних впливів;
- відмова від регламентованих технічних впливів може бути недоцільною;
- порушення графіків ремонтних робіт та постачання запасних частин при заявочній системі.

Вирішення цих проблем можливо здійснити наступними шляхами:

- розробкою більш індивідуального підходу до проведення ТО та Р, враховуючи фактичний стан ТМ та особливості експлуатації кожного об'єкта;
- використанням системи технічної діагностики з встановленими кількісними критеріями визначення періодичності діагностичних перевірок та технічних впливів на ТЗ;
- збереженням регламентованих технічних впливів, проте з більш гнучким та індивідуальним підходом до планування та проведення робіт, враховуючи фактичний стан ТЗ та економічні критерії;
- покращенням організації заявкової системи шляхом оптимізації графіків ремонтних робіт, забезпечення своєчасного постачання запасних частин та планування робіт з урахуванням фактичного стану ТМ.

Ключову роль при підвищенні ефективності використання парку ТМ удосконаленням системи ТОіР відіграють механізми, представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Механізми підвищення ефективності використання парку транспортних і технологічних машин

Механізми	Опис
Індивідуальний підхід	Формування більше індивідуального підходу до проведенню ТОіР, враховуючи фактичний стан ТМ і особливості експлуатації кожного об'єкта.
Кількісні критерії	Впровадження системи ТД з встановленими кількісними критеріями для визначення періодичності діагностичних перевірок і технічних впливів на ТМ.
Регламентовані впливи	Збереження регламентованих технічних впливів, але з більш гнучким і індивідуальним підходом до планування і проведенню робіт з ТОіР, враховуючи фактичний стан ТМ і економічні критерії.
Оптимізація заявної системи ТОіР	Поліпшення організації заявної системи ТОіР шляхом оптимізації графіків ремонтних робіт, забезпечення своєчасного постачання запасних частин і планування робіт з врахуванням фактичного стану ТМ.
Система моніторингу	Впровадження системи моніторингу, що дозволяє безперервно відстежувати технічний стан ТМ, збирати і аналізувати дані, щоб приймати обґрунтовані управлінські рішення.
Раціональний розподіл ресурсів	Розробка раціональної системи планування і розподілу ресурсів для ТОіР, заснованого на аналізі навантаження і пріоритетності ТМ, обліку експлуатаційних умов і потреб виробництва.

Джерело: розроблено авторами

Аналіз таблиці 2 свїдчить, що поєднання зазначених механїзмів дає можливість бїльш ефективно використовувати парк ТЗ та підвищити рївень експлуатацїйної надїйностї кожної одиницї технїки і парку в цїлому.

Висновки

1. Індивідуальний підхід до технїчного обслуговування і ремонту транспортних та технологїчних машин дозволяє бїльш точно враховувати фактичний їх стан та особливості експлуатацїї, що сприяє оптимїзацїї ресурсу та підвищенню ефективностї використання парку машин.

2. Встановлення кїлькїсних критерїїв для перїодичностї діагностування та технїчних впливів дає можливість оптимїзувати розклад робїт, знизити ймовїрность аварїй та покращити планування ресурсів парків машин.

3. Гнучке використання регламентованих технїчних впливів, що враховує фактичний стан машин, дозволяє зберегти високу готовность парку машин до експлуатацїї у разї зниження витрат на необґрунтованї роботи.

Список лїтератури

1. Aulin, V., Hrinkiv, A., Dykha, A., Chernovol, M., Lyashuk, O., Lysenko, S. Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks (2018) *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1-92), pp. 4-13.
2. Hacker L. Limitations of the Exponential Distribution for Reliability Analysis. *Reliability Edge*. 2001. № 3. P. 1-3.
3. Ivanushko O. Optimization of the frequency of vehicle maintenance to prevent the majority of technical failures. *Systemy i srodki transportu samochodnogo. Seria: Transport*. Rzeszow: Politechnika Rzeszowska, 2019. Nr.18, C. 23-31.
4. Аулін В.В. Обґрунтування критерїїв інформативностї і відносної чутливостї діагностичних параметрів технїчного стану трибосистем агрегатів транспортних машин / В.В. Аулін, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко, А.Є. Чернай, Т.М. Замота // Проблеми трибологїї (Problems of tribology). Хмельницький. ХНУ, 2018. №3 С.23-32.
5. Аулін В.В., Гриньків А.В. Теоретичне обґрунтування моментів контролю технїчного стану систем і агрегатів засобів транспорту. *Технїчний сервіс агропромислового, лїсового та транспортного комплексів*. 2017. №8. С. 9-20.
6. Аулін В.В., Гриньків А.В. Теоретичний аналіз діагностичних параметрів технїчного стану систем та агрегатів засобів транспорту за допомогою методів теорїї чутливостї. Науковий вїсник Нацїонального університету біоресурсів і природокористування України. Серія: технїка та енергетика АПК / Редкол.: С.М. Ніколаєнко (відп. ред.) та ін. К., 2017. Вип. 262. С. 227-239.
7. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.О. Кїберфїзичний підхід при створеннї, функціонуваннї та удосконаленнї транспортно-виробничих систем. *Центральнотраїнський науковий вїсник. Технїчні науки*. 2020. Вип. 3(34). С.331-343.
8. Аулін В.В., Гриньків А.В., Голуб Д.В., Агапоненко М.І. Розробка критерїю вдосконалення системи технїчної експлуатацїї засобів транспорту з врахуванням необхідної діагностичної інформацїї. Міжвузівський збірник "Науковї нотатки". Луцьк: Луцький НТУ, 2018. №62. С.17-20.
9. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Лївіцький О.М. та ін. Принципи побудови та функціонування кїберфїзичної системи технїчного сервісу автотранспортної та мобїльної сїльськогосподарської технїки. *Технїчний сервіс агропромислового, лїсового та транспортного комплексів Technical service of agriculture, forestry and transport systems*. №22' 2020. С. 162-174.
10. Баранов В. І. Удосконалення системи технїчного обслуговування автотранспортних засобів. *Вїсник Харківського нацїонального автомобільно-дорожнього університету*. 2020. №91. С. 34-40.
11. Біліченко В.В., Крук В.П. Теоретичнї основи оптимїзацїї структури виробничої бази АТП по технїко-економічним критерїям. *Науковї нотатки*. 2012. Вип. 37. С. 23-26.
12. Герасименко С.В. Оптимїзацїя технїчного обслуговування вантажних автомобїлів. *Автомобільний транспорт*. 2019. №44. С. 29-35.
13. Гнїдюк С. І. Моделї планування технїчного обслуговування будївельних машин. *Машинобудування*. 2020. №5. С. 17-22.
14. Гриньків А.В., Аулін В.В. Елементно-модульна система технїчного обслуговування і ремонту мобїльної сїльськогосподарської технїки. *Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорїї та практики*: зб. тез доповїдей міжнар. наук.-практ. конф., Тернопіль, 29-30 вересня 2022, ТНТУ ім. І. Пулюя. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2022. С.103-104.
15. Данилюк В.В. Аналіз надїйностї машинно-тракторного парку в умовах інтенсивного землеробства. *Технїчний сервіс агропромислового, лїсового та транспортного комплексів*. 2021. № 6. С. 48-53.

16. Данилюк Р. С. Аналіз ефективності експлуатації автотранспортного парку підприємства. *Вісник Транспортної академії України*. 2021. Вип. 45. С. 88-94.
17. Дяченко С.П. Підвищення ресурсу машин шляхом оптимізації технологій ремонту. *Вісник Дніпровського державного аграрно-економічного університету*. 2019. №3. С. 56-61.
18. Єфименко О. М. Підвищення ефективності системи обслуговування вантажного транспорту. *Дорожня інфраструктура*. 2021. №3. С. 14-19.
19. Жарков С. І. Система діагностування технічного стану автотранспортних засобів. *Вісник НАУ. Серія: Транспорт*. 2020. №1. С. 22-27.
20. Зінченко І.А. Організаційно-економічні засади вдосконалення технічного обслуговування вантажного транспорту. *Економіка і регіон*. 2019. №2. С. 112-118.
21. Іващенко С. О. Надійність та довговічність транспортних машин. *Транспортні системи і технології*. 2022. №1. С. 49-55.
22. Камінський П. М. Вибір оптимального інтервалу технічного обслуговування спецтехніки. *Інженерія транспорту*. 2021. №2. С. 30-36.
23. Карпенко Ю. І. Впровадження адаптивної системи ремонту автотранспортних засобів. *Сучасні технології на транспорті*. 2020. №4. С. 61-66.
24. Качан Р. О. Моделювання витрат на технічне обслуговування дорожньо-будівельної техніки. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2021. №3. С. 43-48.
25. Коваль В. В. Автоматизовані системи управління ТО автотранспорту. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. №4(60). С. 107-113.
26. Козак М. А. Визначення техніко-економічної ефективності ремонту транспортних машин. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. № 2. С. 91-96.
27. Козаченко С.А. Дослідження технологій планово-запобіжного технічного обслуговування. *Механізація сільського господарства*. 2019. № 6. С. 66-70.
28. Кравченко Ю. М. Економічна ефективність технічного сервісу при різних системах організації обслуговування. *Вісник СНАУ*. 2021. №3. С. 49-55.
29. Лисенко М.І. Стратегії технічного обслуговування машин: адаптація до сучасних умов. *Інженерія сільськогосподарських систем*. 2022. №2. С. 7-13.
30. Литвин О. І. Система технічного обслуговування і ремонту будівельних машин на підприємствах. *Будівельна техніка і технології*. 2022. №1. С. 20-26.
31. Мельник Р. Б. Вдосконалення структури технічного сервісу автотранспортного підприємства. *Науковий вісник ХНАДУ*. 2021. №93. С. 78-83.
32. Методи оцінювання якості технологічних процесів у системах автосервісу: Монографія / Л.А. Тарандушка та ін. Черкаси: ЧДТУ, 2021. 212 с.
33. Назаренко Д. С. Діагностування технічного стану вантажних автомобілів в умовах експлуатації. *Вісник Транспортної академії*. 2020. Вип. 43. С. 55-60.
34. Нікітін А.О. Моделі ефективного використання машинно-тракторного парку. *Вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2020. № 3. С. 73-79.
35. Одокієнко С.М., Тарандушка Л.А., Тарандушка І.П. Розробка системи параметрів для оцінки якості процесів технічного обслуговування і ремонту автомобілів. *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. № 3/2 (29). С. 52-56.
36. Олійник І. М. Управління технічним станом дорожніх машин. *Транспортні технології*. 2021. №2. С. 9-15.
37. Павленко В.М., Кужель В.П. Визначення можливості використання мультиагентного підходу при виконанні технічного обслуговування і ремонту автомобіля. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. № 1. С. 72-80.
38. Петренко В. Ю. Аналіз ефективності різних систем обслуговування спецтехніки. *Транспорт і логістика*. 2022. №1. С. 37-42.
39. Погребняк А. І. Енерго- та ресурсозбереження у процесах технічного сервісу. *Науковий вісник ЛНТУ*. 2021. Т. 29, №2. С. 39-44.
40. Сакно О.П., Колеснікова Т.М., Олло В.П. Моделювання прийняття рішень в системі технічного обслуговування автомобілів на основі математичних методів теорії нечітких множин. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 6. С. 70-76.
41. Сахно В.П., Іванушко О.М. Вплив умов експлуатації та системи технічного обслуговування і ремонту на технічний стан автотранспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету*. 2017. № 1. С. 363-372.
42. Сахно В.П., Сакно О.П., Лисий О.В. Аналіз умов забезпечення працездатності автотранспортних засобів на основі удосконалення системи технічного обслуговування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. Вип. 158. С. 144-149.
43. Сидоренко Т. А. Методичний підхід до оцінювання ефективності техобслуговування автопарку. *Автомобільний транспорт*. 2019. № 43. С. 40-45.

44. Тимченко В. С. Органїзація діагностування технїчного стану машин. *Технїчний сервіс в агропромисловому комплексї*. 2020. № 4. С. 58-62.
45. Шевченко О. В. Технїчне обслуговування транспортних засобів на підприємствї: проблеми та перспективи. *Економїка транспорту*. 2021. №4. С. 59-65.
46. Юрченко П. М. Вплив їнтенсивностї техобслуговування на надїйностї технїки. *Вїсник аграрної науки Причорномор'я*. 2021. № 1. С. 20-25.
47. Smith J., & Johnson L. Optimization of Maintenance Scheduling for Commercial Vehicle Fleets. *International Journal of Automotive Technology and Management*. 2018. Vol. 12, No. 3. pp. 145–152.
48. Brown T. A. Enhancing Fleet Efficiency through Predictive Maintenance Strategies. *Journal of Transportation Engineering*. 2019. Vol. 145, No. 7. pp. Article 04019041.
49. Davis M. P., Lee S. The Impact of Technical Service Innovations on Vehicle Longevity. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. Vol. 81. Article 102277.
50. Garcia R., et al. A Comprehensive Approach to Preventive Maintenance in Heavy-Duty Vehicles. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2017. Vol. 23, No. 1. pp. 45–59.
51. Patel, V., Chen, Y. Implementing Advanced Diagnostics in Commercial Fleet Repair Strategies. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021. Vol. 70, No. 6. pp. 5294–5302.
52. Nguyen, P. T., Kim, J. Improving Operational Efficiency in Transportation Fleets: A Case Study. *Journal of Transportation Management*. 2018. Vol. 29, No. 4. pp. 36–47.
53. Miller, A. D. Lifecycle Cost Analysis for Modern Transportation Fleets: Benefits of Technology-Based Repair Systems. *International Journal of Engineering Management*. 2020. Vol. 32, No. 2. pp. 179–188.
54. Clark H., Martinez, E. Integration of Telematics and IoT for Proactive Fleet Maintenance. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2019. Vol. 23, No. 4. pp. 361–370.
55. Thompson, R., & White, G. Developing Performance Indicators for Maintenance Effectiveness in Technological Equipment. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 293, No. 3. pp. 1025–1034.
56. Evans, L., Morris, D. The Role of Data Analytics in Optimizing Repair Strategies for Transport Vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018. Vol. 93. pp. 91–102.

References

1. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., Dykha, A., Chernovol, M., Lyashuk, O., & Lysenko, S. (2018). Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1-92), 4–13.
2. Hacker, L. (2001). Limitations of the Exponential Distribution for Reliability Analysis. *Reliability Edge*, (3), 1–3.
3. Ivanushko, O. (2019). Optimization of the frequency of vehicle maintenance to prevent the majority of technical failures. *Systemy i srodki transportu samohodnogo. Seria: Transport*, 18, 23–31.
4. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., Lysenko, S.V., Chernai, A.Ye., & Zamota, T.M. (2018). Obgruntuvannya kryteriyiv informatyvnosti i vidnosnoi chutlyvosti diahnostychnykh parametriv tekhnichnoho stanu trybosystem ahrehativ transportnykh mashyn. *Problemy trybolohii (Problems of tribology)*, (3), 23–32 [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V., & Hryn'kiv, A.V. (2017). Teoretychne obgruntuvannya momentiv kontroliu tekhnichnoho stanu system i ahrehativ zasobiv transportu. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, (8), 9–20 [in Ukrainian].
6. Aulin, V.V., & Hryn'kiv, A.V. (2017). Teoretychnyi analiz diahnostychnykh parametriv tekhnichnoho stanu system ta ahrehativ zasobiv transportu za dopomohoiu metodiv teorii chutlyvosti. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy. Seriya: Tekhnika ta enerhetyka APK*, 262, 227–239 [in Ukrainian].
7. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., & Holovaty, A.O. (2020). Kiberfyzychnyi pidkhid pry stvorenni, funktsionuvanni ta udoskonalenni transportno-vyrobnychykh system. *Tsentrálnoukraiński naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 3(34), 331–343 [in Ukrainian].
8. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., Holub, D.V., & Ahaponenko, M.I. (2018). Rozrobka kryteriiu udoskonalennia systemy tekhnichnoi ekspluatatsii zasobiv transportu z vrahuvanniam neobkhidnoi diahnostychnoi informatsii. *Naukovi notatky*, (62), 17–20 [in Ukrainian].
9. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., Lysenko, S.V., Livitskyi, O.M., et al. (2020). Pryntsypy pobudovy ta funktsionuvannya kiberfyzychnykh system tekhnichnoho servisu avtotransportnoi ta mobilnoi silskohospodarskoi tekhniki. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, (22), 162–174 [in Ukrainian].
10. Baranov, V.I. (2020). Udoskonalennia systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya avtotransportnykh zasobiv. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, (91), 34–40 [in Ukrainian].
11. Bilichenko, V.V., & Kruk, V.P. (2012). Teoretychni osnovy optymizatsii struktury vyrobnychoi bazy ATP po tekhniko-ekonomichnym kryteriiam. *Naukovi notatky*, (37), 23–26 [in Ukrainian].
12. Herasymenko, S.V. (2019). Optymizatsiia tekhnichnoho obsluhovuvannya vantazhnykh avtomobiliv. *Avtomobil'nyi transport*, (44), 29–35 [in Ukrainian].
13. Hnydiuk, S.I. (2020). Modeli planuvannya tekhnichnoho obsluhovuvannya budivel'nykh mashyn. *Mashynobuduvannya*, (5), 17–22 [in Ukrainian].

14. Hryn'kiv, A.V., & Aulin, V.V. (2022). Elementno-modul'na systema tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu mobil'noi sil's'kohospodars'koi tekhniki. In *Protses, mashyny ta obladnannia ahropromyslovoho vyrobnytstva: problemy teorii ta praktyky* (pp. 103–104). Ternopil: FOP Palanytsia V.A. [in Ukrainian].
15. Danyliuk, V.V. (2021). Analiz nadiinosti mashynno-traktornoho parku v umovakh intensyvnogo zemlerobstva. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, (6), 48–53 [in Ukrainian].
16. Danyliuk, R.S. (2021). Analiz efektyvnosti ekspluatatsii avtotransportnoho parku pidpriemstva. *Visnyk Transportnoi akademii Ukrainy*, (45), 88–94 [in Ukrainian].
17. Diachenko, S.P. (2019). Pidvyshchennia resursu mashyn shliakhom optymizatsii tekhnolohii remontu. *Visnyk Dniprovs'koho derzhavnoho ahrarno-ekonomichnoho universytetu*, (3), 56–61 [in Ukrainian].
18. Yefymenko, O.M. (2021). Pidvyshchennia efektyvnosti systemy obsluhovuvannia vantazhnoho transportu. *Dorozhnia infrastruktura*, (3), 14–19 [in Ukrainian].
19. Zharkov, S.I. (2020). Systema diahnostuvannia tekhnichnoho stanu avtotransportnykh zasobiv. *Visnyk NAU. Seriya: Transport*, (1), 22–27 [in Ukrainian].
20. Zinchenko, I.A. (2019). Orhanizatsiino-ekonomichni zasady vdoskonalennia tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnoho transportu. *Ekonomika i rehion*, (2), 112–118 [in Ukrainian].
21. Ivashchenko, S.O. (2022). Nadiinist' ta dohovichnist' transportnykh mashyn. *Transportni systemy i tekhnolohii*, (1), 49–55 [in Ukrainian].
22. Kaminskyi, P.M. (2021). Vybir optimal'nogo intervalu tekhnichnoho obsluhovuvannia spetstekhniki. *Inzheneriia transportu*, (2), 30–36 [in Ukrainian].
23. Karpenko, Yu.I. (2020). Vprovadzhennia adaptivnoi systemy remontu avtotransportnykh zasobiv. *Suchasni tekhnolohii na transporti*, (4), 61–66 [in Ukrainian].
24. Kachan, R.O. (2021). Modeliuvannia vytrat na tekhnichne obsluhovuvannia dorozhn'o-budivel'noi tekhniki. *Avtomobil'ni doryhy i dorozhnie budyvnytstvo*, (3), 43–48 [in Ukrainian].
25. Koval', V.V. (2020). Avtomatyzovani systemy upravlinnia TO avtotransportu. *Systemy upravlinnia, naviatsii ta zviazku*, 4(60), 107–113 [in Ukrainian].
26. Kozak, M.A. (2019). Vyznachennia tekhniko-ekonomichnoi efektyvnosti remontu transportnykh mashyn. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, (2), 91–96 [in Ukrainian].
27. Kozachenko, S.A. (2019). Doslidzhennia tekhnolohii planovo-zapobizhnoho tekhnichnoho obsluhovuvannia. *Mekhanizatsiia sil's'koho hospodarstva*, (6), 66–70 [in Ukrainian].
28. Kravchenko, Yu.M. (2021). Ekonomichna efektyvnist' tekhnichnoho servisu pry riznykh systemakh orhanizatsii obsluhovuvannia. *Visnyk SNAU*, (3), 49–55 [in Ukrainian].
29. Lysenko, M.I. (2022). Stratehii tekhnichnoho obsluhovuvannia mashyn: adaptatsiia do suchasnykh umov. *Inzheneriia sil's'kohospodars'kykh system*, (2), 7–13 [in Ukrainian].
30. Lytvyn, O.I. (2022). Systema tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu budivel'nykh mashyn na pidpriemstvakh. *Budivel'na tekhnika i tekhnolohii*, (1), 20–26 [in Ukrainian].
31. Mel'nyk, R.B. (2021). Vdoskonalennia struktury tekhnichnoho servisu avtotransportnoho pidpriemstva. *Naukovyi visnyk KHNAHU*, (93), 78–83 [in Ukrainian].
32. Tarandushka, L.A., et al. (2021). *Metody otsiniuvannia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv u systemakh avtoservisu: monohrafiia*. Cherkasy: ChDTU [in Ukrainian].
33. Nazarenko, D.S. (2020). Diahnostuvannia tekhnichnoho stanu vantazhnykh avtomobiliv v umovakh ekspluatatsii. *Visnyk Transportnoi akademii*, (43), 55–60 [in Ukrainian].
34. Nikitin, A.O. (2020). Modeli efektyvnogo vykorystannia mashynno-traktornoho parku. *Visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu*, (3), 73–79 [in Ukrainian].
35. Odokienko, S.M., Tarandushka, L.A., & Tarandushka, I.P. (2016). Rozrobka systemy parametriv dlia otsinky yakosti protsesiv tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu avtomobiliv. *Tekhnolohicheskyy audit i rezervy proizvodstva*, 3/2(29), 52–56 [in Ukrainian].
36. Oliinyk, I.M. (2021). Upravlinnia tekhnichnym stanom dorozhnykh mashyn. *Transportni tekhnolohii*, (2), 9–15 [in Ukrainian].
37. Pavlenko, V.M., & Kuzhel', V.P. (2018). Vyznachennia mozhlyvosti vykorystannia multiahentnoho pidkodu pry vykonanni tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu avtomobilia. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, (1), 72–80 [in Ukrainian].
38. Petrenko, V.Yu. (2022). Analiz efektyvnosti riznykh system obsluhovuvannia spetstekhniki. *Transport i lohistyka*, (1), 37–42 [in Ukrainian].
39. Pohrebniak, A.I. (2021). Enerho- ta resursozberezhennia u protsesakh tekhnichnoho servisu. *Naukovyi visnyk LNTU*, 29(2), 39–44 [in Ukrainian].
40. Sakno, O.P., Kolesnikova, T.M., & Ollo, V.P. (2019). Modeliuvannia pryiniattia rishen' v systemi tekhnichnoho obsluhovuvannia avtomobiliv na osnovi matematychnykh metodiv teorii nechitkykh mnozhyn. *Visnyk Prydniprovs'koi derzhavnoi akademii budyvnytstva ta arkhitektury*, (6), 70–76 [in Ukrainian].
41. Sakhno, V.P., & Ivanushko, O.M. (2017). Vplyv umov ekspluatatsii ta systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu na tekhnichniy stan avtotransportnykh zasobiv. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu*, (1), 363–372 [in Ukrainian].

42. Sakhno, V.P., Sakno, O.P., & Lysyi, O.V. (2015). Analiz umov zabezpechennia pratsiezdatsnosti avtotransportnykh zasobiv na osnovi udoskonalennia systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, (158), 144–149 [in Ukrainian].
43. Sydorenko, T.A. (2019). Metodychnyi pidkhid do otsiniuvannia efektyvnosti tekhnichnoho obsluhovuvannia avtoparku. *Avtomobil'nyi transport*, (43), 40–45 [in Ukrainian].
44. Tymchenko, V.S. (2020). Orhanizatsiia diahnostuvannia tekhnichnoho stanu mashyn. *Tekhnichniy servis v ahropromyslovomu kompleksi*, (4), 58–62 [in Ukrainian].
45. Shevchenko, O.V. (2021). Tekhnichne obsluhovuvannia transportnykh zasobiv na pidpriemstvi: problemy ta perspektyvy. *Ekonomika transportu*, (4), 59–65 [in Ukrainian].
46. Yurchenko, P.M. (2021). Vplyv intensyvnosti tekhnichnoho obsluhovuvannia na nadiinist' tekhniky. *Visnyk ahrarnoi nauky Prychornomor'ia*, (1), 20–25 [in Ukrainian].
47. Smith, J., & Johnson, L. (2018). Optimization of maintenance scheduling for commercial vehicle fleets. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 12(3), 145–152.
48. Brown, T.A. (2019). Enhancing fleet efficiency through predictive maintenance strategies. *Journal of Transportation Engineering*, 145(7), Article 04019041.
49. Davis, M.P., & Lee, S. (2020). The impact of technical service innovations on vehicle longevity. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 81, Article 102277.
50. Garcia, R., et al. (2017). A comprehensive approach to preventive maintenance in heavy-duty vehicles. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 23(1), 45–59.
51. Patel, V., & Chen, Y. (2021). Implementing advanced diagnostics in commercial fleet repair strategies. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(6), 5294–5302.
52. Nguyen, P. T., & Kim, J. (2018). Improving operational efficiency in transportation fleets: A case study. *Journal of Transportation Management*, 29(4), 36–47.
53. Miller, A. D. (2020). Lifecycle cost analysis for modern transportation fleets: Benefits of technology-based repair systems. *International Journal of Engineering Management*, 32(2), 179–188.
54. Clark, H., & Martinez, E. (2019). Integration of telematics and IoT for proactive fleet maintenance. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 361–370.
55. Thompson, R., & White, G. (2021). Developing performance indicators for maintenance effectiveness in technological equipment. *European Journal of Operational Research*, 293(3), 1025–1034.
56. Evans, L., & Morris, D. (2018). The role of data analytics in optimizing repair strategies for transport vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93, 91–102.

Serhii Kharchenko, Viktor Baitsan, Dmytro Kosiakievych, Serhii Lysenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Increasing the Efficiency of Using Fleets of Transport and Technological Vehicles by Improving the Maintenance and Repair System

The article is devoted to identifying mechanisms for increasing the efficiency of using fleets of transport and technological machines by improving the maintenance and repair system. Directions for improving the organization of production for maintenance and repair of fleets of transport and technological machines are presented in order to increase the efficiency of their use.

It is shown that the system of machines is formed with the creation of fleets of transport and technological machines. Among their characteristics, the purpose of the machines, their productivity level, age and operating time during operation, and the country of manufacture are highlighted. The modular structure of fleets of transport and technological machines according to certain modular features is considered. The proposed structure will provide maximum efficiency of using the fleet of machines, their production and technical operation. The basic principles of forming fleets of machines are determined.

The main ways of improving the system of maintenance and repair of machines are formulated. The advantages of the improved system are determined: increasing efficiency and productivity, improving the reliability properties of machines, increasing safety and reducing risks, optimizing planning and resource management. Particular attention is paid to minimizing the costs of maintenance and repair of machines and its options: preventive effects and elimination of damage after failures of elements of transport and technological machines. Maintenance and repair systems are defined to ensure the serviceability and operability of machines: planned and warning, notification system, system based on technical diagnostics. System-forming principles of machine parks are formulated. Ways of solving a number of problems are proposed to increase the efficiency of using the fleet of transport and technological machines.

transport vehicle, technological vehicle, efficiency of use, fleet of vehicles, maintenance and repair system, operation, technical diagnostics

Одержано (Received) 21.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 22.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.05.2025

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 656.072

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.394-409](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409)

Цинь Сяосюань, Є. В. Любий, доц., канд. техн. наук

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна**e-mail: lion_khadi@ukr.net*

Аналіз існуючих методів формування моделей потреб пасажирів у пересуваннях

Основною метою статті є проведення аналітичного огляду існуючих методів формування моделей попиту на пересування пасажирів громадським транспортом. Результати огляду сучасних практик створення матриць пасажирських кореспонденцій спрямовані на удосконалення існуючих методів формування моделей транспортного попиту та розробку нових, використання яких створить можливість отримання точної та надійної основи для оцінювання результатів прогнозування розвитку міських транспортних систем.

інтервальна концепція, матриця кореспонденцій, пасажирські перевезення, транспортний попит

Постановка проблеми. Найпроблемнішим етапом моделювання потреб населення у перевезеннях, з позиції складності самого процесу, є генерація матриць пасажирських кореспонденцій (МПК). Основна складність процесу формування фактичної (реальної) МПК на прикладі міста та/або територіальної громади полягає в обмеженості у джерелах та інструментах фахівців з транспортного моделювання в отриманні надійної інформації про фактичні пасажирські кореспонденції, які є базою для моделювання якісної матриці кореспонденцій (МК). При цьому особливо гостро ця проблема проявляється при необхідності моделювання МПК великих і найбільший міст, маршрутні системи яких характеризуються значними розмірами і різноманіттям напрямків перевезення пасажирів [1]. Тому пошук нових та удосконалення існуючих методів створення МПК є актуальною проблемою, рішення якої впливатиме як на ефективність функціонування маршрутних пасажирських систем міст в цілому, так і на розробку та оцінку можливих сценаріїв розвитку системи міського громадського транспорту (ГТ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування МПК є важливим етапом під час моделювання транспортного попиту та організації ефективної роботи ГТ. Існує два основних підходи до побудови таких МПК. Перший базується на проведенні натурних спостережень за переміщенням пасажирів, що дозволяє отримати високоточні дані, але водночас є вкрай трудомістким і дороговартісним методом. Другий підхід ґрунтується на використанні різноманітних моделей, які спираються на статистичну інформацію, апріорні логічні гіпотези та ймовірнісні характеристики транспортного процесу [2-7].

Окрім зазначених методів, сучасні тенденції розвитку транспортного моделювання дозволяють застосовувати новітні підходи, що базуються на використанні інтелектуальних алгоритмів. Зокрема, методи нечіткої логіки і генетичних алгоритмів знаходять широке застосування у прогнозуванні пасажирських перевезень та оптимізації транспортних потоків. Крім того, значну роль відіграють дані, отримані з інтелектуальних транспортних систем, які дозволяють в реальному часі аналізувати пасажиропотоки, що значно підвищує точність та адаптивність моделей.

Таким чином, аналіз методів формування МПК потребує комплексного підходу, який враховує як класичні, так і сучасні методи моделювання, а також можливості, що

відкриваються завдяки впровадженню новітніх технологій у транспортну сферу.

Постановка завдання. Мета даної статті полягає у проведенні аналізу сучасних підходів до формування моделей попиту на пересування пасажирів. Результати проведеного аналізу є основним підґрунтям для розробки нових і удосконалення існуючих методів створення МПК, які б враховували інтервальний підхід до моделювання потреб населення у пересуваннях і гарантували генерацію великої кількості можливих станів МК з урахуванням можливих обмежень.

Виклад основного матеріалу. Основними двома кардинально різними підходами до формування МПК прийнято вважати [2-7]:

- розрахунок МПК на основі проведених натурних спостережень за роботою ГТ (талонне, табличне-опитувальне обстеження пасажиропотоків, опитування користувачів міського пасажирського транспорту на зупинках);

- створення МПК з використанням різноманітних моделей (статистичні, синтетичні, ймовірнісні).

Перевагою використання методів першого підходу є можливість отримання точної, якісної і достовірної вхідної інформації для формування реальної МПК, яка характеризуватиме фактичний стан транспортного попиту на пересування пасажирів у відповідний проміжок часу. У свою чергу, можливими недоліками використання цього підходу для створення МПК можна вважати:

- високу трудомісткість і фінансові витрати. Організація та проведення спостережень вимагають значної кількості персоналу та часу. Витрати на організацію досліджень (зарплата спостерігачів, обладнання, обробка даних) можуть бути досить високими);

- обмежена точність даних. Спостерігачі можуть допускати помилки під час фіксації інформації (наприклад, неточне визначення пункту посадки чи висадки пасажирів). Також людський фактор може впливати на об'єктивність отриманих даних;

- не повна ширина охоплення. Натурні спостереження найчастіше застосовуються на окремих видах транспорту, що не дозволяє комплексно оцінити всі пересування пасажирів у місті. У переважній кількості випадків досліджуються лише трудові пересування;

- вплив зовнішніх факторів. Погодні умови, дорожні затори, аварії або сезонні зміни можуть спотворювати реальні картину щодо пересувань населення під час спостережень;

- складність збору повної інформації про пересадки. Спостереження на зупинках та у транспорті не завжди дозволяють точно визначити кінцеву точку поїздки пасажирів, особливо якщо він здійснює пересадки;

- складність масштабування та оновлення. Для розширення досліджень необхідно залучати більше ресурсів. Отримані дані швидко втрачають актуальність, тому їх потрібно регулярно оновлювати, що додатково підвищує витрати;

- обмеженість у зборі основних соціально-демографічних характеристик. Натурні спостереження не дозволяють отримати детальну інформацію про пасажирів (вік, стать, мету поїздки), що ускладнює сегментацію попиту.

Через ці основні недоліки натурні спостереження зазвичай поєднують з іншими методами збору даних, такими як анкетування, GPS-моніторинг або аналіз даних мобільних операторів, точність результатів поєднання яких також потребує додаткової перевірки.

Моделі, що відносяться до другого підходу, можна розділити на три ключові групи [2-12]: статистичні; синтетичні (апріорні, теоретичні); ймовірнісні.

Статистичні моделі розрахунку МПК дають змогу поширити наявні значення кореспонденцій поточного або раніше дослідженого періоду на майбутній період аналізу. До таких методів належать метод єдиного коефіцієнту росту, метод середніх коефіцієнтів росту, метод Фернесса (Фратара), детройтський метод, моделі середнього арифметичного коефіцієнту росту, паризький метод [3-7, 9, 13].

Загальний сенс моделей коефіцієнтів росту полягає у пропорційному коригуванні існуючої МПК для її використання при описі можливого стану транспортної або маршрутної системи на майбутнє. Найпростішим серед моделей

даного виду є метод єдиного коефіцієнту росту

$$h_{ij} = \tau \cdot r_{ij}, \quad (1)$$

де r_{ij} – величина кореспонденції між транспортними районами (ТР) i та j базової (існуючої) МПК, пас.; τ – коефіцієнт росту для об'єкту, що досліджується.

Складнішим, в рамках цієї групи моделей, є метод Фратара, який передбачає використання для кожного ТР власних коефіцієнтів [13, 14]

$$h_{ij} = r_{ij} \cdot \iota_i \cdot H_j \cdot B_i \cdot V_j, \quad (2)$$

де ι_i, H_j – коефіцієнти росту кореспонденцій для ТР i та j ; B_i, V_j – коефіцієнти для балансування.

Серед переваг моделей цієї групи можна відзначити їхню зрозумілість і простоту, а серед недоліків – потребу у початковій (базовій) МПК, на отримання необхідно витратити велику кількість ресурсів; значна залежність від точності початкової (базової) МПК; не враховують зміни в транспортній пропозиції; обмеженість використання (короткострокове планування).

Наступну групу моделей для формування МПК в рамках другого підходу складають синтетичні (теоретичні) моделі, засновані на апіорних гіпотезах стосовно закономірностей формування кореспонденцій [3-7, 9, 10]. Використання моделей цієї групи вимагає значно менших витрат різного ресурсів для створення МПК, але не гарантують одержання достатньо точних результатів моделювання МК. Найбільшого поширення серед моделей цієї групи отримали гравітаційні, ентропійні моделі, а також метод проміжних можливостей, але слід розуміти, що ці моделі відносяться лише до етапу розподілу кореспонденцій між парами ТР [2-7, 9].

Однією з перших синтетичних моделей, застосованих для встановлення та оцінки міжрайонних кореспонденцій, була гравітаційна модель [15-20]. Модель базується на простому принципі – кореспонденція між районом i та районом j пропорційна загальному обсягу відправлень із району i , загальному обсягу прибуттів у район j та деякій функції індивідуальних витрат на пересування c_{ij} , яка зазвичай залежить від довжини між цими районами. Довжина між ТР відображає рівень доступності транспортної системи, враховуючи швидкість і комфортність пересувань, що забезпечуються транспортною мережею. Спосіб визначення цього параметра (складності пересування) може змінюватися залежно від конкретного варіанту моделі.

За аналогією із законом Ньютона, гравітаційну модель для розрахунку пасажирської кореспонденції можна представити як

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i \cdot A_j}{c_{ij}^2}, \quad (3)$$

або

$$h_{ij} = D_i \frac{A_j \cdot c_{ij} \cdot \omega_j}{\sum_m A_m \cdot c_{im} \cdot \omega_m}, \quad (4)$$

де ω – константа (коефіцієнт калібрування); D_i – місткість ТР i з відправлення, пас.; A_j – місткість ТР j з прибуття, пас.; c_{ij} – функція індивідуальних витрат пасажирів на пересування (складність пересування між ТР); n – кількість ТР районів для об'єкту моделювання, од.

Слід розуміти, що гравітаційні моделі передбачають процедуру обов'язкового калібрування результатів моделювання кореспонденцій для виконання умов балансу розрахункових їх значень з вхідними чисельними значеннями місткостей ТР

$$\sum_{j=1}^n h_{ij} = D_i, \quad \sum_{i=1}^n h_{ij} = A_j, \quad \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{j=1}^n A_j, \quad h_{ij} > 0. \quad (5)$$

Калібрування гравітаційної моделі здійснюється доти, доки не будуть виконані наведені вище умови (5). Слід розуміти, процедура калібрування призводить до суттєвих змін отриманих за залежністю (4) кореспонденцій на початковому етапі, що говорить про низьку достовірність і точність результатів розрахунків МПК за цією моделлю. Різниця між розрахунковими і вхідними (реальними) значеннями при моделюванні пасажирських кореспонденцій може бути дуже суттєвою [4, 21].

Також розповсюдженими є й інші варіанти представлення залежності для розрахунку пасажирських кореспонденцій за гравітаційною моделлю [6]

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i^\alpha \cdot A_j^\beta}{c_{ij}^\gamma}, \quad (6)$$

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i \cdot A_j \cdot f(c_{ij})}{\sum_m A_m \cdot f(c_{im})}, \quad (7)$$

де α, β, γ – емпіричні константи.

Автором [22] запропоновано процедуру одночасного розрахунку кореспонденції за гравітаційною моделлю з їхнім калібруванням щодо фактичних даних про переміщення між ТР. Цільова функція задачі визначення кореспонденцій за цим методом має такий вигляд

$$F(h_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (h'_{ij} - h_{ij})^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

де $F(h_{ij})$ – функція відхилення від потенційних кореспонденцій; h'_{ij} – потенційні кореспонденції між ТР, розраховані за залежністю (3) без урахування ω , пас.; h_{ij} – кореспонденції між ТР, пас.

На думку автора [22] ключовою перевагою запропонованого підходу по зрівнянню із методикою, що базується на використанні коефіцієнтів коригування, є забезпечення найбільш повної аналогії взаємозв'язку між ТР і гравітаційним законом тяжіння фізичних тіл. Для розв'язання задачі (8) автором використано множники Лагранжа, що дозволять знайти відносний екстремум функції.

На відміну «класичних» гравітаційних моделей запропонований у [22] підхід дає можливість розрахувати значення пасажирських кореспонденцій за умов виконання обмежень (5), але, при цьому, неоліком, як і для більшості модифікацій гравітаційних моделей, є врахування лише одного транспортного фактору – відстані між ТР [5, 6].

Слід розуміти, що модифікації гравітаційної моделі, в основному, будуються навколо змін, що стосуються форми представлення функції тяжіння (складності сполучення між ТР). Формування цієї функції ґрунтується на основі даних про переваги у виборі пар ТР відправлення і прибуття або ж при порівнянні розрахункових і фактичних (емпіричних) значень пасажирських кореспонденцій. Варіативність виду функції тяжіння є дуже широкою: показникова, степенева, гіперболічна, комбіновані варіанти, розрахована на основі закону розподілу випадкових величин, встановлена на основі даних про розселення населення тощо [5, 6].

Нижче представлено модифікації функцій тяжіння, що найчастіше застосовувалися в рамках створення МПК з використанням гравітаційної моделі [2-11]:

- «класична» функція тяжіння – визначається з урахуванням зворотнопропорційного впливу відстані між ТР на величину кореспонденції між ними

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n}, \quad (9)$$

де n – ступінь впливу параметру, що характеризує складність пересування між парою ТР (в «класичній» гравітаційній моделі $n=1$, в моделі Якшина – $n=2$, а за параметр складності пересування між ТР приймається час поїздки між ними. У інших дослідженнях пропонується варіювання значення n в залежності від зміни величини c_{ij} , що, на думку авторів, дозволяє точніше визначити фактичні потреби пасажирів у пересуваннях);

- показникова функція тяжіння

$$f(c_{ij}) = e^{-\beta \cdot c_{ij}}, \quad (10)$$

де β – емпіричний коефіцієнт;

- комбінована функція тяжіння

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^n \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}}, \quad (11)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{(1 + c_{ij})^{\varphi(c_{ij})}}, \quad (12)$$

за умови, що

$$\varphi(c_{ij}) = \frac{E}{1 + e^{(F - G \cdot c_{ij})}}, \quad (13)$$

де E, F, G – коефіцієнти калібрування;

- функції тяжіння, що ґрунтуються на законах розподілу випадкових величин (за аргумент розподілу використовується якийсь транспортний фактор)

$$d_F = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}}, \quad (14)$$

$$d_{ij} = \frac{4 \cdot t^2}{\alpha^3 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-t^2}{\alpha^2}}, \quad (15)$$

за умов, що відомі значення середньої, мінімальної і максимальної дальності пересування пасажирів, то згідно [23] функцію тяжіння можна представити через щільності ймовірності розподілу Сімсона

$$f(l) = \begin{cases} \frac{2 \cdot (l - l_{\min})}{(l_{\max} - l_{\min})(l_0 - l_{\min})}, & \text{при } l_{\min} \leq l \leq l_0, \\ \frac{2 \cdot (l_{\max} - l)}{(l_{\max} - l_{\min})(l_{\max} - l_0)}, & \text{при } l_0 \leq l \leq l_{\max}, \\ 0, & \text{у всіх інших випадках,} \end{cases} \quad (16)$$

де σ – параметр закону розподілу, $\sigma = T_{\max} / 3$; t – час пересування між парою ТР, год. (хв.); α – параметр розподілу Максвелла; $l_{\max}, l_{\min}$ – відповідно, максимальне і мінімальне значення випадкової величини; l_0 – мода випадкової величини.

Загальним недоліком розглянутих вище варіантів представлення функції тяжіння є використання лише одного параметру – часу або відстані поїздки між парою ТР за фактор, що характеризує складність сполучення між ними. До цього слід також додати, що авторами робіт [5, 6, 8, 24] підтверджено гіпотезу про незначний вплив транспортних факторів на формування попиту на пересування.

Ще однією модифікацією гравітаційної моделі можна вважати підхід запропонований у [25], в якому використовується комбінованої функції тяжіння EVA. Не дивлячись на це, розподіл кореспонденцій виконується на основі одного параметру – часу пересування між ТР, а точність отриманих результатів розрахунку

кореспонденцій перевіряється функціоналом

$$\sum_{i=1}^n |E_i| = \sum_{i=1}^n |F_i - F_i'| \rightarrow \min, \quad (17)$$

де F_i, F_i' – відповідно, значення емпіричних і розрахункових пасажиропотоків, пас.

Результати аналізу різноманіття модифікацій гравітаційної моделі розрахунку МПК наводять до висновку про те, що основними недоліками цієї частини групи синтетичних моделей є: необхідність проведення процедури калібрування моделі для виконання умов рівності місткості ТР з відправлення і прибуття пасажирів (5), що суттєво впливає на достовірність результатів моделювання пасажирських кореспонденцій; на точність результатів розрахунку впливає вид обраної функції тяжіння, для визначення параметрів якої необхідно проводити натурні спостереження за пересуваннями пасажирів; використання транспортних факторів (час пересування або відстань між ТР) у функції тяжіння не в повній мірі впливає на процес формування транспортного попиту при пересуванні населення міською територією; сумнівна коректність застосування «гравітаційного закону» до моделювання поведінки населення під час поїздки.

Серед групи синтетичних моделей розрахунку МПК значного поширення також отримали ентропійні моделі, які базуються на аналогії між процесами, що відбуваються у транспортних системах і термодинамічними процесами [2, 3, 13, 26]. Цікавість цих моделей полягає в тому, що тут формалізується гіпотеза про рівноважну і випадкову поведінку елементів системи при формуванні її станів. За умов наявності такої гіпотези, найбільш ймовірним є стан системи, за якого її невизначеність, що вимірюється величиною ентропії, максимальна [4]. Використання цього принципу на прикладі вирішення задачі розрахунку пасажирських кореспонденцій передбачає розв'язок залежності

$$\max E = \max \left(- \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot \ln(h_{ij}) \right), \quad (18)$$

де E – ентропія системи; n – кількість ТР для об'єкту моделювання.

За умов практичної реалізації гіпотеза про випадковість поведінки пасажирів замінюється на гіпотезу про наявність апіорних даних про переваги (уподобання) пасажирів при виборі пари ТР, тоді залежність для розрахунку трансформується у (19)

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot \ln \left(\frac{s_{ij}}{h_{ij}} \right) \rightarrow \max, \quad (19)$$

де s_{ij} – «ідеальні» кореспонденції, які відповідають апіорним перевагам (уподобанням) пасажирів при пересуванні.

При цьому враховуються обмеження, які є схожими з (5)

$$\begin{cases} h_{ij} \geq 0; \\ \sum_{j=1}^n h_{ij} = D_i, \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ \sum_{i=1}^m h_{ij} = A_j, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot h_{ij} = B_{\text{заг}}, \end{cases} \quad (20)$$

де $B_{\text{заг}}$ – загальні транспортні витрати на здійснення пересувань.

Основними перевагами ентропійних моделей є незначна трудомісткість виконання розрахунків (проста комп'ютерна програмна реалізація) і простота сприйняття оптимізаційного критерію. Серед ключових недоліків цих моделей можна

відзначити наступні: створення МПК можливе лише за умови замкненості транспортної системи, тобто без додавання нових або закриття наявних ділянок вулично-дорожньої мережі, а також за умов незмінності витрат на пересування ГТ; при розрахунку МПК враховується лише один транспортний фактор, хоча на процес формування транспортного попиту впливає багато факторів (і не тільки транспортних); сумнівна аналогія між процесами, що відбуваються в термодинамічних системах, і транспортних [2, 3, 6, 24, 26].

Групу синтетичних (теоретичних) моделей формування МПК можна продовжити методом зустрічних можливостей [13]. Сенс цього методу полягає в тому, що кожен користувач ГТ при здійсненні поїздки має можливість задовольнити свої потреби у пересуванні по мірі віддалення від початкового пункту і чим довший шлях він долає, тим більше виникає цих можливостей. Тобто при розрахунку величини кореспонденції враховуються ймовірності закінчення пасажиром пересування в альтернативних пунктах призначення (з урахуванням можливості задовольнити потребу пасажирів у пересуванні в цих пунктах) і, які знаходяться на шляху прямування. Математична формалізація моделі розрахунку величини кореспонденції за методом зустрічних можливостей наступна

$$h_{ij}^y = D_i \frac{(e^{-p \cdot n_{y-1}} \cdot e^{-p \cdot n_y})}{(1 - e^{-p \cdot n_A})}, \quad (21)$$

де h_{ij}^y – величина кореспонденції між ТР i та j , на шляху прямування між якими є у альтернативних пунктів, що характеризуються потенційною можливістю закінчення пересування; p – ймовірність задоволення потреби у пересуванні одним можливим пунктом призначення (єдина можливість); n_{y-1}, n_y – накопичена кількість можливих альтернативних пунктів закінчення пересування до пункту y ; A – загальна кількість альтернативних пунктів завершення пересувань.

Недоліками цього методу є той факт, що він базується на припущенні про відносну однорідність розподілу альтернативних пунктів можливого закінчення пересування в межах зони, в рамках якої проводиться дослідження, а також використання лише одного транспортного фактору – відстані поїздки, при розрахунку величини пасажирської кореспонденції [2, 3-7, 13].

У межах групи синтетичних моделей також можна відзначити модель Шелейховського Г.В., яка базується на встановлених автором закономірностях розселення населення міською територією [5, 6]

$$F_{j(t_1, t_2)} = A_j \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{T_{\max}} \ln \frac{T_{\max}}{t_n} dt, \quad (22)$$

де $F_{j(t_1, t_2)}$ – потік пасажирів із зони, що знаходиться між ізохронами t_1 і t_2 , у зону j .

Отже, всі синтетичні моделі розрахунку пасажирських кореспонденцій мають спільний недолік – вони недостатньо обґрунтовано враховують лише один фактор, що характеризує складність пересування між ТР, і найчастіше це відстань або час пересування (поїздки) пасажирів. Крім того, у таких моделях використовується обмежений набір показників для визначення кореспонденцій, причому їхній вибір часто базується на суб'єктивних міркуваннях. Це не дозволяє повною мірою відобразити ймовірнісний і багатофакторний характер трудових зв'язків при формуванні МПК, у результаті чого отримані дані можуть суттєво відрізнятися від реальних, тоді як допустима похибка у прогнозуванні попиту на транспортні послуги не повинна перевищувати 20-25 % [6, 27].

Проблеми і недоліки формування МПК з використанням синтетичних моделей стали поштовхом у розвитку ймовірнісного підходу до формування моделей транспортного попиту. У рамках цього підходу особливої уваги заслуговують моделі дискретного вибору [6, 9, 13, 28]. Ці моделі базуються на припущеннях про вибір

шляху пересування пасажиром з певного набору альтернатив з урахуванням соціально-економічних факторів і їхньої привабливості [28-31]. Найпоширенішими моделями дискретного вибору є: мультиноміальна логіт-модель; ієрархічна логіт-модель; мультиноміальна пробіт-модель; змішана логіт-модель.

На відміну від синтетичних, моделі дискретного вибору більш детально враховують уподобання пасажирів щодо свого пересування, але оцінка точності результатів моделювання кореспонденцій за їх використання суттєво ускладнюється потребою у точній, достовірній інформації про фактичні пересування, яку можна отримати лише за рахунок проведення натурних спостережень або анкетування.

До групи ймовірнісних можна віднести регресійні моделі, сенс яких, в рамках задачі створення МПК, полягає у використанні широкого набору факторів, які характеризують потреби пасажирів у пересуваннях і їх вплив на формування пасажиропотоків через визначення коефіцієнтів регресійної моделі [2, 5, 6, 8, 28].

Також до цієї групи моделей розрахунку МПК відносяться моделі безпосереднього попиту, які використовуються для розв'язання одразу трьох задач з моделювання транспортного попиту – створення, розподіл і поділ [6, 31, 32]. Мультиплікативна модель визначення кореспонденцій представляється наступним чином [33]

$$h_{ijk} = \varphi(P_i \cdot P_j)^{\theta_{T1}} (I_i \cdot I_j)^{\theta_{T2}} \prod_m \left[(t_{ij}^y)^{\alpha_{ry}^{(1)}} (c_{ij}^y)^{\alpha_{ry}^{(2)}} \right], \quad (22)$$

де φ, θ, α – параметри моделі; P_i, P_j – чисельність населення ТР i та j ; I_i, I_j – рівень доходів населення ТР i та j ; t_{ij}^y – час поїздки між ТР i та j з використанням шляху пересування y ; c_{ij}^y – вартість поїздки між ТР i та j з використанням шляху пересування y ;

T – вид транспорту, яким можна користуватися при пересуванні між районами i та j .

Основним недоліком моделі безпосереднього попиту є необхідність використання значної кількості параметрів, які отримуються за рахунок емпіричних досліджень, до цього ж слід додати її обмежене використання в розрізі моделювання саме міських МПК.

Іншим напрямом розвитку ймовірнісних моделей розрахунку МПК є запропонована фахівцями ХНАДУ інтервальна концепція моделювання потреб населення у пересуваннях [8, 34]. Ця концепція ґрунтується на гіпотезі про те, що попит на пересування пасажирів (трудові пересування) носить випадковий характер і повинен бути описаний не однією МК, а їх множиною, кожна з матриць якої характеризує один із можливих станів транспортного попиту. Згідно інтервальної концепції граничними станами МПК є такі, що відповідають мінімальному і максимальному значенням транспортної роботи з реалізації пересувань пасажирів у межах об'єкту дослідження. Таким чином формалізований підхід до моделювання потреб у пересуваннях базується на твердженні про те, що кожен користувач системи ГТ має можливість використати альтернативні варіанти прямування до місця прикладання праці, а також змінювати місце роботи або проживання. За показники, що використовуються для оцінювання точності розрахункових МК, обрано різницю у транспортній роботі (23) та відхилення значень кореспонденцій (24)

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot l_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}' \cdot l_{ij}, \quad (23)$$

$$\Delta H = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (h_{ij} - h_{ij}')^2}, \quad (24)$$

де h_{ij} , h_{ij}' – відповідно, значення кореспонденції між ТР i та j у базовій і розрахунковій МПК, пас.; l_{ij} – відстань між ТР i та j , км.

Основним недоліком інтервальної концепції моделювання потреб населення у

пересуваннях є занадто широкий діапазон можливих станів МПК. Для ліквідації цього недоліку, на прикладі міст різних категорій (великі, середні, малі) науковцями ХНАДУ розроблені підходи щодо звуження діапазону можливих станів МК в рамках реалізації інтервальної концепції моделювання потреб у пересуваннях [2, 4-6].

Так, на прикладі малих міст [4, 11, 12] авторами запропоновано методику формування МПК на основі маршрутних МК кожного маршруту ГТ, які можна отримати за рахунок реалізації натурних спостережень. Зв'язок між кореспонденціями і місткостями зупиночних пунктів з відправлення і прибуття пасажирів описується системою рівнянь (25), на основі якої було виведено загальні аналітичні залежності для розрахунку маршрутних кореспонденцій (26).

Основною перевагою даної методики створення МПК є висока точність вхідної інформації про маршрутні кореспонденції, що отримуються за результатами натурних обстежень. Недоліком є обмеженість застосування підходу для інших категорій міст, оскільки маршрутні мережі міст цієї категорії характеризуються незначною часткою пересувань з пересадками і малою кількістю міських маршрутів.

Отримані в [4] результати дозволили більше ніж у 10 разів скоротити інтервал можливих станів МПК в рамках реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту, досягти повної відповідності значень розрахункових та емпіричних обсягів перевезення пасажирів на маршрутах ГТ та забезпечити достовірну оцінку результатів транспортного моделювання з використанням VISUM на прикладі малих міст.

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1 = h_{13} + \dots + h_{1(n-1)} + h_{1n} = \sum_{j=3}^n h_{1j}; \\ \dots\dots\dots \\ D_e = \sum_{j=e+1}^n h_{ej}, e \in [2; n-2]; \\ \dots\dots\dots \\ A_r = \sum_{i=1}^{r-1} h_{ir}, r \in [3; n-1]; \\ \dots\dots\dots \\ A_n = h_{1n} + h_{2n} + \dots + h_{(n-2)n} = \sum_{i=1}^{n-2} h_{in}; \\ h_{ij} = \sum_{e=1}^{\alpha} D_e - \sum_{r=1}^{\alpha-1} A_r \text{ або } h_{ij} = \sum_{r=1}^{\alpha} A_r - \sum_{e=1}^{\alpha-1} D_e, \text{ або } h_{ij} = \sum_{e=1}^{\alpha} D_e \pm \sum_{r=1}^{\alpha} A_r, \end{array} \right. \quad (25)$$

$$h_{ij} = \sum_{e=1}^{\alpha} D_e - \sum_{r=1}^{\alpha-1} A_r \text{ або } h_{ij} = \sum_{r=1}^{\alpha} A_r - \sum_{e=1}^{\alpha-1} D_e, \text{ або } h_{ij} = \sum_{e=1}^{\alpha} D_e \pm \sum_{r=1}^{\alpha} A_r, \quad (26)$$

де α – кількість місткостей ЗП з відправлення або прибуття, $[1;n]$; e, r – індекси місткостей ЗП, впорядковані в межах множини $[1;\alpha]$.

Розвитком [4] цілком можна вважати роботу [2], в якій запропоновано методику формування МПК на прикладі середніх міст. Представлена методика базується на результатах вибіркового табличного обстеження пасажиропотоків на міських маршрутах з подальшим використанням імітаційної моделі для генерації місткостей зупиночних пунктів за законом Пуассона і, відповідно, розподілом поїздок між зупинками. Далі, отримані таким чином, матриці маршрутних кореспонденцій агрегуються в загальну МПК з урахуванням приналежності кожної зупинки ГТ до відповідного ТР.

За аналогією із [4] в рамках запропонованої методики розрахунку МПК для середній міст використано припущення про відсутність впливу пересадок на формування моделі попиту, що було підтверджено результатами натурних обстежень маршрутних мереж міст цієї категорії. Реалізація розробленої методики в [2] дозволила

досягти суттєвого скорочення витрат різних ресурсів на проведення транспортних обстежень і формування загальної МПК.

На прикладі великих і найкрупніших міст [5] інтервальну концепцію було удосконалено за рахунок врахування випадкових факторів при розрахунку пасажирських кореспонденцій. Для формування можливих станів МПК автором [5] запропоновано рівномірнісний підхід, який базується на моделі (27)

$$h_{ij} = Q \cdot p_i \cdot p_j, \quad (27)$$

$$p_i = \frac{D_i}{Q}, \quad p_j = \frac{D_j}{Q}, \quad \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{j=1}^n A_j = Q \quad (28)$$

де p_i, p_j – відповідно, ймовірність відправлення і прибуття пасажирів з ТР i та у ТР j ; Q – загальна кількість пересувань пасажирів за розрахунковий період (сума по МК), пас.

Для формування можливих станів МПК автором розроблено імітаційну модель, що дозволило досягти суттєвого скорочення меж діапазону розрахункових МК в рамках інтервального підходу до моделювання потреб у пересуваннях. Результати моделювання системи ГТ м. Харкова з використанням VISUM свідчать, що сформована МПК за методикою [5], характеризується достатньо високим рівнем точності – середня помилка моделювання пасажиропотоків на мережі склала майже 8%. Недоліком у розробленій методиці, в свою чергу, є достатньо велика кількість нульових кореспонденцій у згенерованих матрицях, для ліквідації якого необхідно враховувати додаткове обмеження щодо забезпечення відповідності між змодельованими МПК і фактичною МК за кількісною ознакою.

У цьому ж напрямку також слід відзначити роботу [6], в рамках якої авторам також вдалося суттєво звужити діапазон можливих станів МПК у рамках інтервальної концепції, за рахунок використання функції розселення населення міською територією при розрахунку кореспонденцій. Такий результат досягнуто за рахунок використання лише тих станів МК, що відповідають фактичним закономірностям трудового розселення населення.

До того ж слід відзначити ефективність використання інтервального підходу до моделювання потреб населення у пересуваннях у розрізі вирішення завдання щодо визначення місця розташування міжміської автостанції та встановлення її впливу на розподіл міських пасажиропотоків [3].

Представлені у [2, 4-6] методики формування МПК для різних категорій міст дозволили досягти суттєвого звуження діапазону можливих станів попиту на пересування пасажирів і покращити розуміння положень і припущень інтервальної концепції моделювання потреб у пересуваннях, а також отримали широке практичне застосування при виконанні реальних науково-дослідницьких робіт і проєктів, спрямованих на оптимізацію роботи систем ГТ в українських містах [35-41].

З розвитком технологій у науковій літературі почали з'являтися нові підходи до вирішення задачі формування МПК. Наприклад, авторами [42] для моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів використано елементи теорії нечіткої логіки. Значення кореспонденцій за цим підходом визначаються наступним чином

$$h_{ij} = \frac{2^{\frac{1}{\ln 2} C_{hij}}}{n_i \cdot n_j \sum_{r=1+m_b(i)}^{m_e(i)} \sum_{s=1+m_b(j)}^{m_e(j)} 2^{\frac{1}{\ln 2} C_{hrs}}} \cdot t_{ij}, \quad (29)$$

де n_i, n_j – відповідно, кількість «вищих» (укрупнених) і звичайних ТР;

t_{ij} – тривалість пересування між ТР; C_{hij}, C_{hrs} – компоненти, що встановлюються з використанням теорії нечіткої логіки на основі транспортного параметру – відстані від зупиночних пунктів мережі до потенційних пунктів тяжіння.

Іншим прикладом використання елементів нечіткої логіки і генетичних алгоритмів є робота [43], де розглядається задача визначення кореспонденцій з подальшим їх розподілом для сукупності промислових міст і територій відпочинку (туристичні місця) авіаційним транспортом. За результатами тестових прогонів розробленої моделі отримано достатньо точну оцінку розрахункових значень пасажиропотоків при їх порівнянні з реальними даними.

Моделі розрахунку та розподілу кореспонденцій, сформованих на основі нечіткої логіки та генетичних алгоритмів, що представлені як у [43], так і в інших роботах [44-50], розроблені та апробовані не на прикладі міської МПК при пересуваннях пасажирів ГТ. У більшості випадків, за об'єкт дослідження обрано авіа сполучення між містами або містами і туристичними зонами, або розглядається окрема система ГТ, наприклад, швидкісне залізничне сполучення.

Слід зауважити, що моделі розрахунку загальноміської МПК на основі теорії нечіткої логіки та генетичних алгоритмів не отримали належного розвитку на практиці. Основною проблемою цього слід вважати відсутність якісної вхідної інформації – базової (фактичної) МК, на основі якої існувала б можливість якісного «навчання» цих моделей, а також суб'єктивність при виборі параметрів функцій належності [9, 31, 49, 51].

Також з розвитком техніки і технологій, а також цифровізації галузі міського пасажирського транспорту, з'явилися підходи до створення МПК на основі аналізу та агрегування даних операторів стільникового зв'язку [51]; інформації з петлевих детекторів, GPS і ANPR-камер [52]; інформації з різноманітних платіжних систем [53] тощо. Слід відзначити, що на даний час, на жаль, використання подібної інформації для створення МПК на прикладі українських міст і України в цілому, є обмеженим. Причинами цього є, по-перше, провадження військового стану в країні; по-друге, відсутність загальноприйнятого підходу на рівні міських територіальних громад щодо автоматизованого збору і аналізу даних про пересування населення ГТ; по-третє, більшість міст не мають відповідного бюджету на реалізацію проєктів з впровадження електронних систем оплати проїзду в ГТ і аналізу пасажиропотоків; по-четверте, відсутність ініціативи у пасажирських перевізників (в першу чергу приватних) щодо облаштування транспортних засобів необхідною для збору інформації технікою про перевезених пасажирів, через небажання виведення з тіні даних про реальні обсяги перевезення; та інші.

Недоліки підходів до формування МПК свідчать про те, що навіть найбільш розповсюджені методи розрахунку МК (гравітаційний, ентропійний метод) не гарантують необхідної точності результатів моделювання попиту на перевезення пасажирів у містах і є лише джерелом отримання якогось проміжного стану попиту, який зафіксовано в результаті обстеження пасажиропотоків на маршрутній мережі [1]. Отримані в такий складний спосіб МПК використовуються фахівцями з транспортного моделювання лише для отримання первинних якісних оцінок функціонування системи ГТ, а їх застосування для прогнозування розвитку систем ГТ практично неможливо через необхідність суттєвого оновлення вхідних даних про місткості ТР. Це підтверджує той факт, що задача моделювання потреб населення у пересуваннях ГТ є складним до кінця не вирішеним питанням як з практичної, так й наукової точки зору, вирішення якого потребує подальшого розвитку методів формування МПК з урахуванням сучасних тенденцій розвитку галузі транспортного планування.

Окремої уваги в рамках проведеного аналізу заслуговує інтервальна концепція моделювання потреб населення у пересуваннях, яка ґрунтується на випадковому виборі пасажирів джерел і напрямків поїздок [8]. Хоча й реалізація концепції гарантує достовірність результатів розрахунків [2, 4-6, 8, 34], проте вона не містить механізму створення проміжних станів попиту в межах можливого інтервалу, які можуть характеризуватися дуже значним розкидом, і що ускладнює практичне використання інтервальної концепції.

Складність формування МПК, з точки зору, реалізації інтервальної концепції моделювання потреб населення в пересуваннях ГТ полягає у необхідності розробки множини альтернативних варіантів МК, які б характеризували можливі стани транспортного попиту в рамках обмежень на мінімальну і максимальну транспортну роботу по реалізації МК [3, 8]. Використання найбільш розповсюджених на даний час методів формування МПК не гарантує отримання й частини можливого переліку станів МПК для реалізації інтервальної концепції [1].

Результати дослідження [54] щодо створення методу випадкової генерації кореспонденцій в матриці можна вважати однією із перших спроб ліквідації недоліку інтервальної концепції стосовно заповнення діапазону можливих станів МК. Але представлений у цій роботі метод за умов накладання додаткових обмежень далеко не завжди гарантує успіху при моделюванні МК. У даний час авторами даної роботи проводяться дослідження щодо удосконалення методу [54].

Висновки. Кожний з проаналізованих груп методів формування моделей попиту на пересування пасажирів властиві свої недоліки, які, по-перше, пов'язані з трудомісткістю отримання та обробки вхідної інформації про пасажиропотоки на мережі маршрутів ГТ, по-друге, з точністю відображення моделі потреб у пересуваннях пасажирів і, по-третє, переважна більшість методів дозволяють отримати лише один стан МПК, що відповідатиме конкретним даним, які характеризують відповідний часовий проміжок, і створений за умов використання обмеженого переліку транспортних факторів, найчастіше відстань або час пересування між ТР. Ці недоліки суттєво впливають на якість результатів транспортного моделювання через обмеженість розрахункових МПК, яка пов'язана із неповним врахуванням випадкового характеру здійснення і вибору напрямів поїздок користувачами ГТ та неможливістю описати повний діапазон можливих станів МПК.

Ліквідувати представлені недоліки можна за рахунок реалізації інтервальної концепції моделювання попиту на пересування пасажирів, що передбачатиме розробку множини МПК, які відповідатимуть відомим груповим характеристикам процесу перевезення пасажирів. Наявність різних варіантів МПК створює можливість отримання надійної оцінки наслідків розгляду альтернативних напрямків розвитку транспортних систем міст для фахівців з транспортного планування.

Моделювання множини різних варіантів МК в рамках реалізації інтервальної концепції доцільно проводити з використанням імітаційних моделей. За основу можна прийняти поетапний метод генерації МПК [54], який потребує удосконалення за рахунок урахування групових обмежень при формуванні МПК.

Список літератури

1. Любий Є.В., Ковцур К.Г., Цинь Сяосюань Постановка задачі випадкового заповнення матриці пасажирських кореспонденцій. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 2(23) (2024). С. 152-158. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>.
2. Гончаренко С.Ю. Визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в середніх містах : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2015. 182 с.
3. Пашкевич С.М. Дослідження впливу розташування міжміської автостанції на розподіл міських пасажиропотоків: дис. ... доктора філософії: 275. Харків, 2024. 222 с.
4. Любий Є.В. Визначення попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом : автореф. дис. здоб. наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2012. 22 с.
5. Россолов О.В. Удосконалення інтервальної концепції визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в великих містах : автореф. дис. здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2012. 21 с.
6. Горбачов П.Ф., Свічинський С.В. Інтервальне моделювання потреб населення міст у перевезеннях громадським транспортом на основі функції розселення : монографія. Харків: ХНАДУ, 2016. 148 с.
7. Акбар Джан Полад Закономірності функціонування системи міського пасажирського транспорту міста Кабул : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2017. 189 с.
8. Горбачов П.Ф. Концепція формування систем маршрутного пасажирського транспорту в містах: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.01. Харків, 2009. 370 с.

9. Білоус А.Б., Демчук І.А. Analysis methods and models of calculation of passenger correspondence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 3(3(69)) (2014). С. 53–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24545>.
10. Dragu. V., Roman. Eu. A. The Origin–Destination Matrix Development. MATEC Web of Conferences. 9th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2019 “Trends in New Industrial Revolution”. 2019. 290. 06010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929006010>
11. Любий Є.В., Колій О.С. Оцінка точності синтетичних моделей розрахунку пасажирських кореспонденцій на прикладі малих міст. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2019. 1(12) (2019). С. 99–106. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.40>
12. Любий Є.В., Россолов О.В. Формування моделі попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом. *Комунальне господарство міст*. 2013. № 107. С. 422–426.
13. Ortuzar J. de D., Willumsen L.G. Modelling transport. Third edition. John Wiley & Sons Ltd., 2006. 499 p.
14. Fratar T.J. Vehicular Trip Distribution by Successive Approximation. *Traffic Quarterly*. 1954. №8. P. 53–65.
15. Carrothers G.A.P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *Journal of the American Institute of Planners*. 1956. № 22. P. 94–102.
16. Voorhees A.M. A general theory of traffic movement. Institute of Traffic Engineers Past Presidents’ Award Paper. New Haven : ITE, 1955. P. 46–56.
17. Wilson A.G. A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*. 1967. № 1. P. 253–270.
18. Wilson A.G. A family of spatial interaction models and associated developments. *Environment and Planning A: Economy and Space*. 1971. № 3. P. 255–282.
19. Vries J.J., Nijkamp P., Rietveld P. Alonso’s General Theory of Movement: Advances in Spatial Interaction Modeling. Free University of Amsterdam, Department of Spatial Economics, Tinbergen Institute Discussion Paper. 2000. TI 2000-062/3.
20. Haynes E.K., Fotheringham A.S. Gravity and Spatial Interaction models. Sage-Publications. 1984. P. 9–13.
21. Transport Planning and Traffic Engineering / [M.G.H. Bell, P.W. Bonsall, G.R. Leake, A.D. May, C.A. Nash, C.A. O’Flaherty] ; C.A. O’Flaherty Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. 544 p
22. Вдовиченко В.О. Ефективність функціонування міської пасажирської транспортної системи : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Київ, 2004. 19 с.
23. Кузькін О.Ф. Моделювання пасажирських кореспонденцій у системах міського маршрутного транспорту загального користування. *Вісник ВПІ*. 2009. 5. С. 79–82.
24. Горбачов П.Ф. Оцінка впливу транспортних факторів на результати вибору людиною робочого місяця. *Вісник ХНАДУ*. 2008. 43. С. 86–91.
25. Lohse, D., Teichert, H., Dugge, B., Bachner, G. Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen unter Beachtung von Nebenbedingungen einschließlich Parameterschätzung (Verkehrsnachfragemodellierung: Erzeugung, Verteilung, Aufteilung). Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, H. 5/1997, Fakultät Verkehrswissenschaften, “Friedrich List”, Technische Universität Dresden, 1997. Available: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/tvp/Downloads/Heft-5.pdf (дата звернення 01.03.2025).
26. Wilson A.G. Entropy in Urban and Regional Modelling. London: Pion, 1970. 166 p.
27. Quarmby D.A. Choice of Travel Mode for the Journey to Work. *Journal of Transport Economics and Policy*. 1967. 1(3). P. 273–314.
28. Горбачов П.Ф., Свічинська О.В. Моделювання вибору шляху пересування пасажирів у міських системах громадського транспорту: монографія. Харків, 2016. 124 с.
29. Preston J. Demand Forecasting for New Local Rail Stations and Services. *Journal of Transport Economics and Policy*. 1991. 25(2). P. 183–202.
30. PTV Visum 2024. Офіційний сайт компанії «PTV Planung Transport Verkehr GmbH». URL: https://vision-startpage.ptvgroup.com/fileadmin/Startpage/Visum/Overview_Visum2024.pdf (дата звернення 02.03.2025).
31. Півторак Г.В. Визначення параметрів мережі міських пасажирських перевезень на основі моделей теорії корисності з випадковим вибором : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Львів, 2021. 202 с.
32. Sustainable Approaches to Urban Transport. Ed. D. Mohan, G. Tiwari. Boca Raton: CRC Press, 2019. 329 p.
33. Manheim, M.L. Fundamentals of Transportation Systems Analysis. Cambridge: MIT Press, 1979. 674 p.
34. Горбачов П.Ф. Нова концепція моделювання потреб населення у трудових пересуваннях міським пасажирським транспортом. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2009. 27. С. 210–214.
35. Аналіз діючої транспортної мережі м. Конотоп. Проведення обстеження пасажиропотоків. Обробка матеріалів обстеження пасажиропотоків по маршрутах. Розробка заходів щодо оптимізації транспортної мережі м. Конотоп: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0121U112782. Харків, 2021. 124 с.
36. Проведення аналізу та оптимізації транспортних систем міста Краматорськ: звіт про НДР (кінцевий). ХНАДУ, № державної реєстрації 0116U006995. Харків, 2016. 220 с.
37. Розробка комплексної схеми руху транспорту м. Луцька: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0117U006848. Харків, 2018. 309 с.
38. Розробка схеми руху громадського транспорту в місті Суми: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0108U006961. Харків, 2008. 51 с.

39. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі міста Кіровоград: звіт про НДР (заклучний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0112U00692. Харків, 2012. 115 с.
40. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі м. Олександрія : звіт про НДР (заклучний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0113U005179. Харків, 2013. 130 с.
41. Моделювання та аналіз маршрутної мережі громадського транспорту міста Нікополя: звіт про НДР (заклучний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0115U004775. Харків, 2015. 197 с.
42. Berbey, A.A., Caballero, G.R., de Dios, S.B., Galán, L.R. A fuzzy logic inference approach for the estimation of the passengers flow demand. *International Conference on Fuzzy Computation and 2nd International Conference on Neural Computation*. 2010. P. 125–129.
43. Kalis, M., Teodorovic, D. Trip distribution modeling using fuzzy logic and a genetic algorithm. *Transportation Planning and Technology*. 2003. 26(3). P. 213–238.
44. Kalić M., Kuljanin J. and Dožić S. Air Travel Demand Fuzzy Modelling. Trip Generation and Trip Distribution. *Conference on Soft Computing in Industria Applications Anywhere on Earth*. 2012. P. 10–21.
45. Jassbi J., Makvandi P., Ataei M., Sousa Pedro A.S. Soft system modeling in transportation planning: Modeling trip flows based on the fuzzy inference system approach. *African Journal of Business Management*. 2011. 5(2). P. 505–514.
46. Medina J., Yepes V. Optimization of touristic distribution networks using genetic algorithms. *Statistics and Operations Research Transactions*. 2003. 27(1). P. 95–112.
47. Goel S., Singh J., Ashok K. Trip Distribution Model for Delhy Urban Area Using Genetic Algorithm. *International Journal of Computer Engineering Science*. 2012. 2(3). P. 125–131.
48. Kompil M., Celik H. Modelling trip distribution with fuzzy and genetic fuzzy systems. *Transportation Planning and Technology*. 2013. 36(2). P. 170–200.
49. Форнальчик С.Ю., Білоус А.Б., Демчук І.А. Застосування нечіткої логіки та генетичних алгоритмів у моделях пасажирських пересувань. *Автомобільний транспорт*. 2014. 35. С. 122-127.
50. Пархоменко Л.О., Лавренюк В.О. Розроблення нечіткої моделі прогнозування кореспонденцій пасажирів у швидкісному русі на основі принципів просторової взаємодії. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. 164. С. 15-22.
51. Кара І.А. Визначення пасажиропотоків на міських маршрутах з використанням нечіткої логіки та транзакцій абонементів стільникового зв'язку : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Львів, 2017. 208 с.
52. Sbaï, A., Van Zuylén, H. J., Li, J., Zheng, F. F., & Ghadi, F. Estimation of an urban OD matrix using different information sources. In *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017 - 17th International Conference, 2017* (Vol. 10405, pp. 183-198). (Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics); Vol. 10405). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62395-5_14.
53. Fan, W., Chen, Zh. Estimation of origin-destination matrix and identification of user activities using public transit smart card data (Final Report). Center for Advanced Multimodal Mobility Solutions and Education. University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC. 2018. 92 p.
54. Івахнік В.С. Новий метод реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту. *Вісник ВПІ*. 2022. 6 (2022). С. 57–64. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>.

References

1. Liubiyi, Ye., Kovtsur, K., & Qin, X. (2024). Formulation of the problem of random completion of the OD-matrix. *Advances in mechanical engineering and transport*. 2(23) (2024), 152-158. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>
2. Honcharenko, S.Yu. (2015). *The demand determining for passenger route transport service in the middle cities*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
3. Pashkevych, S.M. (2024). *Research of the influence of an intercity bus station location on the distribution of urban passenger flows*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
4. Liubiyi, Ye.V. (2012). *Trip demand determination of small towns' population for route passenger transportation*. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
5. Rossolov O.V. (2012). *Improvement of the interval concept for determining the demand for passenger route transport services in large cities*. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
6. Horbachov, P.F., & Svichynskyi, S.V. (2016). *Interval modeling of urban population needs for public transportation based on the settlement function*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
7. Akbar Jan Polad. (2017). *Regularities of the functioning for the system of Kabul city urban passenger transport*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
8. Horbachov, P.F. (2009). *The concept of forming passenger transport systems in cities*. Doctor's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
9. Bilous, A.B., & Demchuk, I.A. (2014). Analysis methods and models of calculation of passenger correspondence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3(69) (2014), 53–57. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24545>
10. Dragu, V., & Roman, Eu.A. (2019). The Origin–Destination Matrix Development. MATEC Web of Conferences. *9th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2019 “Trends in New Industrial Revolution”*. 290 (2019). 06010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929006010>

11. Liubiyi, Ye.V., & Kolii, O.S. (2019). Estimation of accuracy of synthetic models of calculation of passenger correspondence on an example of small towns. *Advances in mechanical engineering and transport*, 1(12) (2019), 99-106. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.40>
12. Liubiyi, Ye.V., & Rossolov, O.V. (2013). Formation of a model of demand for the movement of the population of small towns by passenger transport. *Municipal economy of cities*, 107, 422-426. [in Ukrainian].
13. Ortuzar, J. de D., & Willumsen, L.G. *Modelling transport*. Third edition. John Wiley & Sons Ltd.
14. Fratar, T.J. (1954.) Vehicular Trip Distribution by Successive Approximation. *Traffic Quarterly*, 8, 53-65.
15. Carrothers, G.A.P. (1956). An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *Journal of the American Institute of Planners*, 22, 94-102.
16. Voorhees, A.M. (1955). *A general theory of traffic movement*. Institute of Traffic Engineers Past Presidents' Award Paper. New Haven : ITE.
17. Wilson, A.G. (1967). A statistical theory of spatial distribution models. *Transpro Research*, 1, 253-270.
18. Wilson, A.G. (1971). A family of spatial interaction models and associated developments. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 3, 255-282.
19. Vries, J.J., Nijkamp, P., & Rietveld, P. (2000). *Alonso's General Theory of Movement: Advances in Spatial Interaction Modeling*. Free University of Amsterdam, Department of Spatial Economics, Tinbergen Institute Discussion Paper. TI 2000-062/3.
20. Haynes, E.K., & Fotheringham, A.S. (1984). Gravity and Spatial Interaction models. Sage-Publications.
21. Bell, M.G.H., Bonsall, P.W., & Leake, G.R., et al. (1997). *Transport Planning and Traffic Engineering*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
22. Vdovychenko, V.O. (2004). *Efficiency of the urban passenger transportation system*. Extended abstract of candidate's thesis. Kyiv: NTU [in Ukrainian].
23. Kuzkin, O.F. (2009). Modeling of passenger correspondence in public transport systems of urban route transport. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 5, 79-82.
24. Horbachov, P.F. (2008). Evaluation of the impact of transport factors on the results of a person's choice of a job. *Bulletin of KhNAHU*, 43, 86-91.
25. Lohse, D., Teicher, H., Dugge, B., & Bachner, G. (1997). *Determination of traffic flows with n-linear equation systems under consideration of constraints including parameter estimation (traffic demand modeling: generation, distribution, splitting)*. Publication series of the Institute of Transport Planning and Road Traffic, H. 5/1997, Faculty of Transport Sciences, "Friedrich List", Dresden University of Technology. http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/ivp/Downloads/Heft-5.pdf [in German]
26. Wilson, A.G. (1970). *Entropy in Urban and Regional Modelling*. London: Pion.
27. Quarmby, D.A. (1967). Choice of Travel Mode for the Journey to Work. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1(3), 273-314.
28. Horbachov, P.F., & Svichynska, O.V. (2016). *Modeling the choice of passengers' travel routes in urban public transportation systems*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
29. Preston, J. (1991). Demand Forecasting for New Local Rail Stations and Services. *Journal of Transport Economics and Policy*, 25(2), 183-202.
30. PTV Visum 2024. Official company website «PTV Planung Transport Verkehr GmbH». URL: https://vision-startpage.ptvgroup.com/fileadmin/Startpage/Visum/Overview_Visum2024.pdf
31. Pivtorak G.V. *Determination of parameters of urban passenger transportation network based on models of random utility theory*. PhD thesis. Lviv: LPNU [in Ukrainian].
32. Mohan, D., & Tiwari, G. (2019). *Sustainable Approaches to Urban Transport*. Boca Raton: CRC Press.
33. Manheim, M.L. (1979). *Fundamentals of Transportation Systems Analysis*. Cambridge: MIT Press.
34. Horbachov, P.F. (2009). A new concept of modeling the needs of the population in labor transportation by urban passenger transport. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan*, 27, 210-214.
35. R&D report 0121U112782. (2021). *Analysis of the existing transport network of Konotop. Conducting a passenger flow survey. Processing of passenger flow survey materials by routes. Development of measures to optimize the transport network of Konotop city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
36. R&D report 0116U006995. (2016). *Analysis and optimization of transport systems in Kramatorsk city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
37. R&D report 0117U006848. (2018). *Development of a comprehensive traffic scheme for the Lutsk city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
38. R&D report 0108U006961. (2008). *Development of a public transport scheme in Sumy city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
39. R&D report 0112U00692. (2012). *Development of a rational variant of the route network in Kirovograd city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
40. R&D report 0113U005179. (2013). *Development of a rational variant of the route network in Oleksandriia city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
41. R&D report 0115U004775. (2015). *Modeling and analysis of the public transport route network in Nikopol city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].

42. Berbey, A.A., Caballero, G.R., de Dios, S.B., & Galán, L.R. (2010). A fuzzy logic inference approach for the estimation of the passengers flow demand. *International Conference on Fuzzy Computation and 2nd International Conference on Neural Computation*, 125–129.
43. Kalis, M., & Teodorovic, D. (2003). Trip distribution modeling using fuzzy logic and a genetic algorithm. *Transportation Planning and Technology*, 26(3), 213–238.
44. Kalić, M., Kuljanin, J. & Dožić, S. (2012). Air Travel Demand Fuzzy Modelling. Trip Generation and Trip Distribution. *Conference on Soft Computing in Industria Applications Anywhere on Earth*, 10–21.
45. Jassbi, J., Makvandi, P., Ataei, M., & Sousa Pedro, A.S. (2011). Soft system modeling in transportation planning: Modeling trip flows based on the fuzzy inference system approach. *African Journal of Business Management*, 5(2), 505–514.
46. Medina, J., & Yepes, V. (2003). Optimization of touristic distribution networks using genetic algorithms. *Statistics and Operations Research Transactions*, 27(1), 95–112.
47. Goel, S., Singh, J., & Ashok, K. (2012). Trip Distribution Model for Delhi Urban Area Using Genetic Algorithm. *International Journal of Computer Engineering Science*, 2(3), 125–131.
48. Kompil, M., & Celik, H. (2013). Modelling trip distribution with fuzzy and genetic fuzzy systems. *Transportation Planning and Technology*, 36(2), 170–200.
49. Fornalchuk, Ye.Yu., Bilous, A.B., & Demchuk, I.A. (2014). Application of fuzzy logic and genetic algorithms in passenger travel models. *Automobile transport*, 35, 122–127.
50. Parkhomenko, L.O., & Lavreniuk, V.O. (2016). Development of a fuzzy model for predicting passengers' correspondences in high-speed traffic based on the principles of spatial interaction. *Collection of scientific works of UkrSUTR*, 164, 15–22.
51. Kara, I.A. (2017). *Determination of passenger traffic on city routes using fuzzy logic and transactions of subscribers of cellular communication*. PhD thesis. Lviv: LPNU [in Ukrainian].
52. Sbaï, A., Van Zuylen, H.J., Li, J., Zheng, F.F., & Ghadi, F. (2017). Estimation of an urban OD matrix using different information sources. In *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017 - 17th International Conference, 2017. Lecture Notes in Computer Science*, 10405. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62395-5_14
53. Fan, W., & Chen, Zh. (2018). *Estimation of origin-destination matrix and identification of user activities using public transit smart card data* (Final Report). Center for Advanced Multimodal Mobility Solutions and Education. University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC.
54. Івахнік, B.C. (2022). A New Method for Implementing the Interval Concept of Transport Demand Modeling. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 6 (2022), 57–64. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>

Xiaoxuan Qin, Yevhen Liubiyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Analysis of Existing Methods of Forming Models of Passenger Travel Needs

The aim of the article is to conduct an analytical review of existing methods of forming models of demand for passenger transportation by public transport. The results of the review of modern practices of creating passenger correspondence matrices are aimed at improving the existing methods of forming transport demand models and developing new ones, the use of which will make it possible to obtain an accurate and reliable assessment of the results of forecasting the development of urban transport systems.

The main focus of the article is on the analysis of existing approaches to the formation of urban passenger correspondence matrices as the key input information on which the overall assessment of the results of the implementation of measures to improve passenger route networks and the development of urban areas in general is based, as well as the most problematic stage of the transport demand modeling process. The two fundamentally different approaches to modeling transport demand for passenger movement - conducting field surveys and using synthetic (a priori) models for calculating correspondences - have inherent disadvantages that significantly limit their use, but their combination (for example, a selective tabular survey of passenger flows and the gravity method) helps to obtain a variant of the correspondence matrix that characterizes one of the possible states of transport demand in the relevant time period. But, ultimately, the models of passenger travel needs obtained in this way do not guarantee the accuracy of the results of calculating the correspondence matrices.

The advantages of the interval approach to modeling passenger correspondence matrices make it a reliable tool for assessing alternative directions for the development of transport and route systems of cities, taking into account the creation of a set of variants of correspondence matrices that would meet the existing restrictions in the calculation of matrix elements. To form different variants of passenger correspondence matrices, it is advisable to use simulation models of correspondence generation.

interval concept, correspondence matrix, passenger transportation, transport demand

Одержано (Received) 25.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ INFORMATION ABOUT AUTHORS

Амірсеїдов Магомед Ельдарханович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5778-7065>, e-mail: radiy.amirseidov@gmail.com.

Mahomed Amirseidov, PhD student in Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5778-7065>, e-mail: radiy.amirseidov@gmail.com.

Апаракін Антон Русланович - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5847-7739>, e-mail: anton.aparakin@gmail.com.

Anton Aparakin - Candidate of technical sciences, Senior teacher of the department "Mechanical engineering, mechatronics and robotics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-5847-7739>, e-mail: anton.aparakin@gmail.com.

Артеменко Дмитро Юрійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6633-0470>, e-mail: artemenkodyu@kntu.kr.ua.

Dmytro Artemenko - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Mechanical Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6633-0470>, e-mail: artemenkodyu@kntu.kr.ua.

Аулін Віктор Васильович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: [0000-0003-2737-120X](https://orcid.org/0000-0003-2737-120X), e-mail: aulinvv@gmail.com.

Aulin Viktor - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-120X>, e-mail: aulinvv@gmail.com.

Байцан Віктор Григорович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3519-9090>, e-mail: v.baitsan@landtech-ukraine.com.

Viktor Baitsan - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3519-9090>, e-mail: v.baitsan@landtech-ukraine.com.

Бережа Олена Юріївна - професорка, докторка фізико-математичних наук, професорка кафедра вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9848-9737>, e-mail: bereza.o.yu@dsau.dp.ua.

Olena Bereza - Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the department of higher mathematics, physics and general engineering courses, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9848-9737>, e-mail: bereza.o.yu@dsau.dp.ua.

Бондарчук Віктор Костянтинович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9710-3537>, e-mail: barbaross2@ukr.net.

Viktor Bondarchuk - PhD student in Automation, computer-integrated technologies and robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-9710-3537>, e-mail: barbaross2@ukr.net.

Будат Катерина Володимирівна – здобувач вищої освіти на першому рівні за спеціальністю «Комп’ютерна інженерія», Одеський національний університет імені І.І.Мечникова, м. Одеса, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5176-5730>, e-mail: budat.kateryna@stud.onu.edu.ua.

Kateryna Budat - Student, Odesa I. I. Mechnykov National University, Odesa, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5176-5730>, e-mail: budat.kateryna@stud.onu.edu.ua.

Висоцька Вікторія Анатоліївна - доцент, доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних систем і мереж, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, ORCID: 0000-0001-6417-3689, e-mail: victoria.a.vysotska@lpnu.ua.

Victoria Vysotska - Associate Professor, Doctor in Information Technology (Doctor of Technical Sciences), Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: 0000-0001-6417-3689, e-mail: victoria.a.vysotska@lpnu.ua.

Вінтенко Борис Юрійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна, провідний інженер-програміст КБ АСУ ТП ПАТ «Науково-виробниче підприємство «Радій», м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3748-0374>, e-mail: boris.vintenko@gmail.com.

Borys Vintenko - PhD student, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, leading engineer-programmer of KB ACS TP PJSC "Radio Scientific and Production Enterprise", Kropyvnytskyi, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3748-0374>, e-mail: boris.vintenko@gmail.com.

Віштак Інна Вікторівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5646-4996>, e-mail: vishtakiv@vntu.edu.ua.

Inna Vishtak - Associate Professor, PhD in Engineering Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor, Associate Professor of Department Safety of Life and Pedagogical Safety, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5646-4996>, e-mail: vishtakiv@vntu.edu.ua.

Воронін Михайло Миколайович - здобувач вищої освіти на першому рівні за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ТОВ "Технічний університет "Метінвест Політехніка", м. Запоріжжя, Україна, e-mail: mykhailo.voronin@mipolytech.education.

Voronin Mykhailo - Student, Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: mykhailo.voronin@mipolytech.education.

Гаркуша Микола Васильович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>, e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua.

Mykola Harkusha - Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>, e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua.

Гевко Богдан Романович - кандидат економічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1639-2136>, e-mail: gevkobr@gmail.com.

Bogdan Hevko - PhD in Economic Sciences (Candidate of Economic Sciences), Associate Professor of the Automobiles department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1639-2136>, e-mail: gevkoivan1@ukr.net, 0967351082.

Гевко Іван Богданович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5170-0857>, e-mail: gevkoivan1@ukr.net.

Ivan Hevko - Professor, Doctor of Science, Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5170-0857>, e-mail: gevkoivan1@ukr.net.

Головатий Артем Олегович - асистент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9552-0089>, e-mail: artemholovatyi@ukr.net.

Artem Holovatyi - Assistant lecturer, Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9552-0089>, e-mail: artemholovatyi@ukr.net.

Гречка Андрій Іванович - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1188-7412>, e-mail: angre17@gmail.com.

Andrii Hrechka - Associate Professor, Candidate of technical sciences, Head of the department "Mechanical engineering, mechatronics and robotics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-1188-7412>, e-mail: angre17@gmail.com.

Гриньків Андрій Вікторович - старший дослідник, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4478-1940>, e-mail: AVGrinkiv@gmail.com.

Andrii Hrynkiv - Senior Researcher, PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Lecturer of the Department of Machinery Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4478-1940>, e-mail: AVGrinkiv@gmail.com.

Гудзь Сергій Анатолійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри архітектури, Приазовський державний технічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4764-8635>, e-mail: goods_s_a@pstu.edu.

Serhii Hudz - Associate Professor, PhD in Structural Engineering and Building Construction (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Architecture Academic Department, Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-4764-8635>, e-mail: goods_s_a@pstu.edu.

Гупка Андрій Богданович - кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-7565-5664>, e-mail: Gypkab@gmail.com.

Andrii Gupka - Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-7565-5664>, e-mail: Gypkab@gmail.com.

Гуральник Олександр Борисович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія», Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1175-8726>, e-mail: gurualexua@gmail.com.

Oleksandr Huralnyk - PhD student in Computer Engineering, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1175-8726>, e-mail: gurualexua@gmail.com.

Гуцул Василь Іванович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики та фізики, Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4155-5355>, e-mail: vigutsul@ukr.net.

Vasiliy Gutsul - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4155-5355>, e-mail: vigutsul@ukr.net.

Давиденко Олександр Олександрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0176-3256>, e-mail: oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua.

Oleksandr Davydenko - Associate Professor, PhD in Construction Mechanics (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0176-3256>, e-mail: oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua.

Дарієнко Віктор Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин та будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9023-6030>, e-mail: vvdarienko@gmail.com.

Viktor Dariienko - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Department of Construction, Road Machinery and construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-9023-6030>, e-mail: vvdarienko@gmail.com.

Деркач Олексій Дмитрович - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри експлуатації машинно-тракторного парку, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-8022>, e-mail: addsau@gmail.com.

Oleksii Derkach - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Head of the Department of Machine and Tractor Park Operation, Dnipro state agrarian and economic university, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5537-8022>, e-mail: addsau@gmail.com.

Деркач Ярослав Олександрович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-7208-370X>, e-mail: cisconflexx@gmail.com.

Yaroslav Derkach - PhD student, Kharkiv National University of Radio Electronics, 14 Nauky Avenue, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-7208-370X>, e-mail: cisconflexx@gmail.com.

Дідик Олександр Костянтинович - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1454-0828>, e-mail: didyk_s79@ukr.net.

Oleksandr Didyk - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-1454-0828>, e-mail: didyk_s79@ukr.net.

Доренський Олександр Павлович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7625-9022>, e-mail: dorenskyiop@kntu.kr.ua.

Oleksandr Dorenskyi - Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Cybersecurity and Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-7625-9022>, e-mail: dorenskyiop@kntu.kr.ua.

Дубиняк Тарас Степанович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри приладів і контрольно-вимірювальних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1529-6951>, e-mail: d_taras@ukr.net.

Taras Dubynyak - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Instruments and Control and Measurement Systems, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1529-6951>, e-mail: d_taras@ukr.net.

Дубінін Євген Олександрович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6176-7358>, e-mail: dubinini-rmn@ukr.net.

Yevhen Dubinin - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Machine Repair Technology, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6176-7358>, e-mail: dubinini-rmn@ukr.net.

Дячун Андрій Євгенович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1354-9468>, e-mail: dyachun_andriy@ukr.net.

Andrii Diachun - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Mechanical Engineering Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1354-9468>, e-mail: dyachun_andriy@ukr.net.

Єрємін Павло Миколайович - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6650-3389>, e-mail: p24124@gmail.com.

Pavlo Yeromin - Candidate of technical sciences, Senior teacher of the department "Mechanical engineering, mechatronics and robotics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-6650-3389>, e-mail: p24124@gmail.com.

Золотий Роман Захарійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9435-2642>, e-mail: Zoloty@gmail.com.

Roman Zoloty - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Computer-Integrated Technologies Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9435-2642>, e-mail: Zoloty@gmail.com.

Казак Павло Олександрович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія», Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8449-0267>, e-mail: neprodazhniy@gmail.com.

Pavlo Kazak - PhD student in Construction and Civil Engineering, National Transport University, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8449-0267>, e-mail: neprodazhniy@gmail.com.

Каліч Віктор Михайлович - професор, кандидат технічних наук, професор кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7625-9022>, e-mail: vmk041954@gmail.com.

Viktor Kalich - Professor, Candidate of Technical Sciences, Professor of Production Processes Automation Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7625-9022>, e-mail: vmk041954@gmail.com.

Карявкіна Наталія Сергіївна - здобувачка вищої освіти, ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», Запоріжжя, Україна, ORCID: 0009-0000-2457-6280, e-mail: karavkinanatalia@gmail.com.

Nataliya Karyavkina - Student, LLC "Technical University "Metinvest Polytechnic", Zaporizhia, Ukraine, ORCID: 0009-0000-2457-6280, e-mail: karavkinanatalia@gmail.com.

Кириченко Андрій Миколайович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4335-9588>, e-mail: amkyrychenko@gmail.com.

Andrii Kyrychenko - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the department "Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-4335-9588>, e-mail: amkyrychenko@gmail.com.

Кириченко Віктор Вікторович - доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м.Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0575-8684>, email: v.kyrychenko@nubip.edu.ua.

Viktor Kyrychenko - Associate Professor, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Science, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0575-8684>, email: v.kyrychenko@nubip.edu.ua.

Кислун Олег Андрійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6059-3731>, e-mail: kyslun@gmail.com.

Oleh Kyslun - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Cybersecurity and Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-6059-3731>, e-mail: kyslun@gmail.com.

Коваленко Олександр Володимирович - професор, доктор технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9297-0650>, e-mail: dr.kovalenkoov@gmail.com.

Oleksandr Kovalenko - Professor, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Cybersecurity & Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9297-0650>, e-mail: dr.kovalenkoov@gmail.com.

Ковальов Сергій Григорович - кандидат педагогічних наук, викладач кафедри вищої математики та фізики, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: 0009-0002-3922-8697, e-mail: kovalyovserggr@ukr.net.

Kovalov Serhii - Candidate of Pedagogical Sciences, Lecturer, Department of Higher Mathematics and Physics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: 0009-0002-3922-8697, e-mail: kovalyovserggr@ukr.net.

Ковальов Юрій Григорович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпілотних технологій та штучного інтелекту, Українська державна льотна академія, Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1729-2033>, e-mail: kovalyovserggr@ukr.net.

Kovalov Yuriy - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Unmanned Technologies and Artificial Intelligence, Ukrainian State Flight Academy, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1729-2033>, e-mail: kovalyovserggr@ukr.net.

Козарчук Ігор Анатолійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4972-6016>, e-mail: igorkozarchuk@ntu.edu.ua.

Ihor Kozarchuk - Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4972-6016>, e-mail: igorkozarchuk@ntu.edu.ua.

Козуб Наталія Олександрівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри програмних засобів і технологій, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0406-0161>, e-mail: actinis1@gmail.com.

Nataliia Kozub - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-0406-0161>, e-mail: actinis1@gmail.com.

Комар Роман Васильович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-7965-4784>, e-mail: rkomar@ukr.net.

Roman Komar - Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Engineering of Manufacturing Technologies, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-7965-4784>, e-mail: rkomar@ukr.net.

Корнієнко Олександр Сергійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6234-784X>, e-mail: aleksandrkorvienko19992106@gmail.com.

Oleksandr Korniienko - PhD student, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6234-784X>, e-mail: aleksandrkorvienko19992106@gmail.com.

Косякевич Дмитро Петрович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4806-4189>, e-mail: kosykdimon@gmail.com.

Dmytro Kosiakievych - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4806-4189>, e-mail: kosykdimon@gmail.com.

Котенко Андрій Степанович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5506-9985>, e-mail: kotenko.a0015@lntu.edu.ua.

Andrii Kotenko - PhD student, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5506-9985>, e-mail: kotenko.a0015@lntu.edu.ua.

Краснокутський Максим Володимирович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0132-4245>, e-mail: simson1988@ukr.net.

Maksym Krasnokutskyi - PhD student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0132-4245>, e-mail: simson1988@ukr.net.

Красота Артем Михайлович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7700-9176>, e-mail: kras.kras.kras.365@gmail.com.

Artem Krasota - PhD student in Industrial Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7700-9176>, e-mail: kras.365@gmail.com.

Красота Михайло Віталійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8791-3264>, e-mail: krasotamv@ukr.net.

Mykhailo Krasota - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Exploitation and repairing machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8791-3264>, e-mail: krasotamv@ukr.net.

Кропивний Олександр Олександрович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6445-092X>, e-mail: a.krp78@gmail.com.

Oleksandr Kropivny - PhD student in Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6445-092X>, e-mail: a.krp78@gmail.com.

Кузнецова Марта Ярославівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, теплових та атомних електричних станцій, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, ORCID: orcid.org/0000-0002-0492-2243, e-mail: marta.y.kuznetsova@lpnu.ua.

Marta Kuznetsova - Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Heat Engineering, Thermal and Nuclear Power Plants, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: orcid.org/0000-0002-0492-2243, e-mail: marta.y.kuznetsova@lpnu.ua.

Кульова Дар'я Олександрівна - доктор філософії, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6727-5357>, e-mail: d.coolava@gmail.com.

Daria Kulova – PhD in Transport Technologies, Senior Lecturer at the Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6727-5357>, e-mail: d.coolava@gmail.com.

Ладизенський Едуард Дмитрович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Транспортні технології», ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”, м. Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0004-8992-9402> e-mail: ladizenskiy@gmail.com.

Eduard Ladyzhenskyi - PhD student in Transport Technologies, State Higher Educational Institution “Priazov National Technical University”, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8992-9402> e-mail: ladizenskiy@gmail.com.

Лакно Мирослав Валерійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6979-6076>, e-mail: valss725@gmail.com.

Miroslav Lakhno - PhD student in Computer Science Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6979-6076>, e-mail: valss725@gmail.com.

Лисенко Сергій Володимирович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-7817>, e-mail: sv07091976@gmail.com.

Serhii Lysenko - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of ERM, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-7817>, e-mail: sv07091976@gmail.com.

Литвин Віталій Анатолійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0063-6995>, e-mail: litvinvitaliy@gmail.com.

Vitaly Lytvyn - PhD student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0063-6995>, e-mail: litvinvitaliy@gmail.com.

Лівіцький Олександр Миколайович - кандидат технічних наук, асистент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-4463>, e-mail: Livitskyi885@gmail.com.

Oleksandr Livitskyi - PhD (Candidate of Technical Sciences), Assistant Lecturer at the Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-4463>, e-mail: Livitskyi885@gmail.com.

Лозинська Ольга Володимирівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних систем і мереж, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, ORCID: 0000-0002-5079-0544, e-mail: Olha.v.lozynska@lpnu.ua.

Olga Lozynska - Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-5079-0544, e-mail: Olha.v.lozynska@lpnu.ua.

Любий Євген Володимирович - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0681-0920>, e-mail: lion_khadi@ukr.net.

Yevhen Liubyi - Associate Professor, PhD in Engineering, Head of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0681-0920>, e-mail: lion_khadi@ukr.net.

Ляшук Олег Леонтійович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-8568>, e-mail: oleglashuk@ukr.net.

Oleg Lyashuk - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of Automobiles Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-8568>, e-mail: oleglashuk@ukr.net.

Магопєць Сергій Олександрович - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-4555>, e-mail: magserg@ukr.net.

Sergiy Mahopets - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Head of the Department of Machinery Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-4555>, e-mail: magserg@ukr.net.

Макаренко Дмитро Олександрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації машинно-тракторного парку, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3166-6249>, e-mail: flymakd@gmail.com.

Dmytro Makarenko - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Machine and Tractor Park Operation, Dnipro state agrarian and economic university, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3166-6249>, e-mail: flymakd@gmail.com.

Малахов Євгеній Валерійович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри математичного забезпечення комп'ютерних систем, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна, ORCID: 0000-0002-9314-6062, e-mail: eugene.malakhov@onu.edu.ua.

Eugene Malakhov - Professor, Dr.Sc., Head of the Department of Mathematical Support of Computer Systems, Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine, ORCID: 0000-0002-9314-6062, e-mail: eugene.malakhov@onu.edu.ua.

Манько Єгор Валерійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6355-2413>, e-mail: evm0996496486@gmail.com.

Yehor Manko - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6355-2413>, e-mail: evm0996496486@gmail.com.

Марків Оксана Олександрівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних систем і мереж, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, ORCID: 0000-0002-1691-1357, e-mail: oksana.o.markiv@lpnu.ua.

Oksana Markiv - Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID:0000-0002-1691-1357, e-mail: oksana.o.markiv@lpnu.ua.

Мартинів Лариса Ярославівна - старший викладач кафедри комп'ютерних систем та технологій, Одеський національний університет імені І.І.Мечникова, м. Одеса, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7351-1467>, e-mail: larysa.yaroslavna@onu.edu.ua.

Larysa Martynovych - Senior Lecturer at the Department of Computer Systems and Technologies, Odesa I. I. Mechnykov National University, Odesa, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7351-1467>, e-mail: larysa.yaroslavna@onu.edu.ua.

Матвієнко Олександр Олександрович - здобувач наукового ступеня доктора наук, доцент, кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5408-8293>, e-mail: richdad.ua@gmail.com.

Oleksandr Matviienko - Doctoral Student, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5408-8293>, e-mail: richdad.ua@gmail.com.

Матійчук Любомир Павлович – доцент, доктор економічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6701-4683>, e-mail: mlpstat@gmail.com.

Liubomyr Matiichuk – Associate Professor, Doctor of Economics, Professor of the Department of Computer Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6701-4683>, e-mail: mlpstat@gmail.com.

Мацуй Анатолій Миколайович - професор, доктор технічних наук, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5544-0175>, e-mail: matsuyan@ukr.net.

Anatolii Matsui - Professor, Doctor of technical sciences, Associate Professor of the Department of Production Process Automation, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5544-0175>, e-mail: matsuyan@ukr.net.

Маяк Микола Михайлович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8626-3084>, e-mail: mayak@lutsk-ntu.com.ua.

Mykola Mayak - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8626-3084>, e-mail: mayak@lutsk-ntu.com.ua.

Мельченко Андрій Сергійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Прикладна механіка», Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, e-mail: 3360333@gmail.com.

Andrii Melchenko - PhD student in Applied Mechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, e-mail: 3360333@gmail.com.

Миронець Ірина Валеріївна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2007-9943>, e-mail: i.myronets@chdtu.edu.ua.

Iryna Myronets - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department of information security and computer engineering, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2007-9943>, e-mail: i.myronets@chdtu.edu.ua.

Мисак Степан Йосифович - доцент, кандидат технічних наук, науковий співробітник кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2064-7015>, e-mail: stepan.y.mysak@lpnu.ua.

Stepan Mysak - Associate Professor, PhD, Researcher of Department of Automation and Computer Integrated Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2064-7015>, e-mail: stepan.y.mysak@lpnu.ua.

Муранов Євген Сергійович - асистент кафедри експлуатації машинно-тракторного парку, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9148-217X>, e-mail: muranov.ye.s@dsau.dp.ua.

Yevhen Muranov - Assistant lecturer of the Department of Operation of Machine and Tractor Park, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9148-217X>, e-mail: muranov.ye.s@dsau.dp.ua.

Надич Тарас Миколайович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5610-6767>, e-mail: tnadych@gmail.com.

Taras Nadych - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5610-6767>, e-mail: tnadych@gmail.com.

Настоящий Владислав Анатолійович - професор, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин та будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8931-5097>, e-mail: vanast52@ukr.net.

Vladyslav Nastoiashchyi - Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Department of Construction, Road Machinery and construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-8931-5097>, e-mail: vanast52@ukr.net.

Недощев Максим Владиславович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Комп'ютерні науки», Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9820-0649>, email: m.nedoshev@nubip.edu.ua.

Maksym Nedoshev - PhD student in Computer Science, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9820-0649>, email: m.nedoshev@nubip.edu.ua.

Ніщенко Євгеній Олександрович - здобувач вищої освіти на другому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9681-6278>, e-mail: inishchemenko@gmail.com.

Evgen Nishchemenko - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9681-6278>, e-mail: inishchemenko@gmail.com.

Онищук Василь Петрович - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>, e-mail: v.onyshchuk@lntu.edu.ua.

Vasyl Onyshchuk - Associate Professor, PhD, Head of the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5316-408X>, e-mail: v.onyshchuk@lntu.edu.ua.

Паньків Сергій Михайлович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0078-0023-6141-4892>, e-mail: pankiv@gmail.com.

Serhiy Pankiv - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0078-0023-6141-4892>, e-mail: pankiv@gmail.com.

Петленко Володимир Павлович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4006-3202> e-mail: Tpetlenko@ukr.net.

Volodymyr Petlenko - PhD student in Automobile Transport, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4006-3202> e-mail: Tpetlenko@ukr.net.

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

Michael Podryhalo - Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology and Machine Repair, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>, e-mail: pmikhab@gmail.com.

Полянський Олександр Сергійович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0407-6435>, e-mail: khadi.pas@gmail.com.

Oleksandr Polyanskii - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Machine Repair Technology, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0407-6435>, e-mail: khadi.pas@gmail.com.

Портнов Геннадій Давидович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин та будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1521-2086>, e-mail: budkom999@gmail.com.

Hennadii Portnov - Associate Professor, PhD in Mechanisation and Electrification of Agricultural Production (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Construction, Road Machines and Civil Engineering Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0005-1521-2086>, e-mail: budkom999@gmail.com.

Приходько Андрій Сергійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна, ORCID: 0000-0002-7109-5508, e-mail: whiterandrek@gmail.com.

Andriy Prykhodko - PhD student, Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine, ORCID: 0000-0002-7109-5508, e-mail: whiterandrek@gmail.com.

Прокопович-Ткаченко Дмитро Ігоревич - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Університет митної справи та фінансів, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6590-3898>, e-mail: omega2417@gmail.com.

Dmytro Prokopovych-Tkachenko - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Cyber Security and Information Technologies, University of Customs and Finance, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6590-3898>, e-mail: omega2417@gmail.com.

Пукалов Віктор Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-5861>, e-mail: pukalovvictor@gmail.com.

Viktor Pukalov - Associate Professor, PhD in Processes and Machines for Pressure Shaping (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Machine Parts and Applied Mechanics Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-0848-5861>, e-mail: pukalovvictor@gmail.com.

Рибальченко Людмила Володимирівна - доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Університет митної справи та фінансів, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0413-8296>, e-mail: Luda_r@ukr.net.

Liudmyla Rybalechenko - Associate Professor, PhD in Economics (Candidate of Economics Sciences), Associate Professor of the Department of Cyber Security and Information Technologies, University of Customs and Finance, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0413-8296>, e-mail: Luda_r@ukr.net.

Рогатинський Роман Михайлович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-8536-4599>, e-mail: rogatynskyi@gmail.com.

Roman Rohatynskyi - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobiles Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-8536-4599>, e-mail: rogatynskyi@gmail.com.

Рухлов Артем Володимирович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем, ТОВ "Технічний університет "Метінвест Політехніка", м. Запоріжжя, Україна, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9430-8396>, e-mail: artem.rukhlov@mipolytech.education.

Rukhlov Artem - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Automation, Electrical and Robotic Systems Department, Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC, Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9430-8396>, e-mail: artem.rukhlov@mipolytech.education.

Рухлова Наталія Юріївна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем, ТОВ "Технічний університет "Метінвест Політехніка", м. Запоріжжя, Україна, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-8864>, e-mail: nataliia.rukhlova@mipolytech.education.

Rukhlova Nataliia - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Automation, Electrical and Robotic Systems Department, Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC, Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-8864>, e-mail: nataliia.rukhlova@mipolytech.education.

Савенко Олег Станіславович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних системи, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4104-745X>, e-mail: savenko_oleg_st@ukr.net.

Oleg Savenko - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computer Engineering and Information Systems, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4104-745X>, e-mail: savenko_oleg_st@ukr.net.

Сахно Володимир Прохорович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua.

Volodymyr Sakhno - Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Automobiles, National Transport University, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua.

Сербул Олександр Миколайович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1836-5529>, e-mail: serbulan@ukr.net.

Oleksandr Serbul - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-1836-5529>, e-mail: serbulan@ukr.net.

Сергійчук Андрій Андрійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3588-0560>, e-mail: kirovogradsto@gmail.com.

Andrii Serhiichuk - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3588-0560>, e-mail: kirovogradsto@gmail.com.

Сергійчук Андрій Вікторович - начальник випробувальної лабораторії ТОВ "Автомотодіагностика", м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3669-7611>, e-mail: stokirovograd@gmail.com.

Andrii Serhiichuk - Head of the testing laboratory of Avtomotodiagnosics LLC, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3669-7611>, e-mail: stokirovograd@gmail.com.

Сіправська Марія Дмитрівна - старший викладач кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6758-6593>, e-mail: mariaradyk03@ukr.net.

Mariia Sipravska - Senior lecturer of the Automobiles department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6758-6593>, e-mail: mariaradyk03@ukr.net.

Скринник Іван Олександрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин та будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1949-3197>, e-mail: skrinnikio@kntu.kr.ua.

Ivan Skrynnik - Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Department of Construction, Road Machinery and construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-1949-3197>, e-mail: skrinnikio@kntu.kr.ua.

Слонь Віктор Вікторович - кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, архітектури та дизайну, Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5535-0794> e-mail: viktor.ukrain2015@gmail.com.

Viktor Slon - Candidate of Technical Science, Association Professor of the Department of Construction, Architecture and Design, Kherson State Agrarian and Economic University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5535-0794> e-mail: viktor.ukrain2015@gmail.com.

Смірнов Володимир Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4752-0527>, e-mail: swckntu@gmail.com.

Volodymyr Smirnov - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Industrial Process Automation Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4752-0527>, e-mail: swckntu@gmail.com.

Смірнов Олексій Анатолійович - професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9543-874X>, e-mail: dr.smirnova@gmail.com.

Oleksii Smirnov - Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of Cybersecurity & Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9543-874X>, e-mail: dr.smirnova@gmail.com.

Смірнова Наталія Володимирівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5683-5766>, e-mail: snvntu@gmail.com.

Nataliia Smirnova - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Industrial Process Automation Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5683-5766>, e-mail: snvntu@gmail.com.

Смірнова Тетяна Віталіївна - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6896-0612>, e-mail: sm.tetyana@gmail.com.

Tetiana Smirnova - Candidate of Science (Engineering), Senior Lecturer, Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6896-0612>, e-mail: sm.tetyana@gmail.com.

Стельмашук Станіслав Валерійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6981-1040>, e-mail: stanislav0077@ukr.net.

Stanislav Stelmashchuk - PhD student, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6981-1040>, e-mail: stanislav0077@ukr.net.

Стібайло Олег Юрійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Прикладна механіка», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9680-5426>, e-mail: oleh.stibailo@gmail.com.

Oleg Stibailo - PhD student, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9680-5426>, e-mail: oleh.stibailo@gmail.com.

Сукачов Валерій Вікторович - завідувач навчально-наукової лабораторії кафедри експлуатації машинно-тракторного парку, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1524-3222>, e-mail: sukachov.v.v@gmail.com.

Valerii Sukachov – Head of the Educational and Scientific Laboratory of the Department of Operation of Machine and Tractor Park, Dnipro state agrarian and economic university, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1524-3222>, e-mail: sukachov.v.v@gmail.com.

Тарандушка Іван Павлович - старший викладач кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5182-3811>, e-mail: i.tarandushka@chdtu.edu.ua.

Ivan Tarandushka - Senior Lecturer of vehicles and technology for their operation Department, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5182-3811>, e-mail: i.tarandushka@chdtu.edu.ua.

Тарандушка Людмила Анатоліївна - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1410-9088>, e-mail: l.tarandushka@chdtu.edu.ua.

Liudmyla Tarandushka - Professor., Doctor of Engineering, Head of vehicles and technology for their operation Department, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1410-9088>, e-mail: l.tarandushka@chdtu.edu.ua.

Тесля Володимир Олегович - кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7865-4712>, e-mail: volodymyr_teslya@ukr.net.

Volodymyr Teslia - PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Automobiles department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7865-4712>, e-mail: volodymyr_teslya@ukr.net.

Тесля Сергій Валерійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7294-2465>, e-mail: tesliasv@ukr.net.

Serhiy Teslia - PhD student in Automation, computer-integrated technologies and robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7294-2465>, e-mail: tesliasv@ukr.net.

Тищенко Сергій Юрійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8193-3641>, e-mail: tc.eso.ua@gmail.com.

Serhii Tyshchenko - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8193-3641>, e-mail: tc.eso.ua@gmail.com.

Ткаченко Ігор Григорович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-2639-7988>, e-mail: tkachenkoigor61@gmail.com.

Ihor Tkachenko - Associate Professor, PhD, Associate Professor at the Department of Engineering of Manufacturing Technologies, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-2639-7988>, e-mail: tkachenkoigor61@gmail.com.

Федотова Маріанна Олександрівна - кандидат технічних наук, асистент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5827-1685>, e-mail: Skrynnik_2002@ukr.net.

Marianna Fedotova - Candidate of Technical Sciences, Assistant lecturer, Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5827-1685>, e-mail: Skrynnik_2002@ukr.net.

Харченко Сергій Володимирович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1835-5085>, e-mail: s.kharchenko.ua@gmail.com.

Serhii Kharchenko - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1835-5085>, e-mail: s.kharchenko.ua@gmail.com.

Хорошун Роман Васильович - асистент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1862-7640>, e-mail: roman_086@ukr.net.

Roman Khoroshun - Assistant of the Automobiles department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1862-7640>, e-mail: roman_086@ukr.net.

Цапок Ярослав Олегович - фізична особа підприємець, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8545-1912>, e-mail: yaroslavtsapok@ukr.net.

Yaroslav Tsapok - Individual entrepreneur, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8545-1912>, e-mail: yaroslavtsapok@ukr.net.

Цимбал Богдан Михайлович - доцент, доктор наук з державного управління, професор кафедри охорони праці та екологічної безпеки навчально-наукового інституту управління та безпеки населення, Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна, доцент кафедри автоматизації, електро- та роботехнічних систем факультету автоматизації виробництва та цифрових технологій, ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», Запоріжжя, Україна, ORCID: 0000-0002-2317-3428, e-mail: tsembalbogdan@ukr.net.

Bohdan Tsybmal - Associate Professor, Doctor of Science in Public Administration, Professor of the Department of Occupational Safety and Environmental Safety of the Educational and Scientific Institute of Management and Population Safety, National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine, Associate Professor of the Department of Automation, Electrical and Robotic Systems of the Faculty of Production Automation and Digital Technologies, LTD "Technical University "Metinvest Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2317-3428, e-mail: tsembalbogdan@ukr.net.

Цинь Сяосюань - здобувачка вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3736-619X>, e-mail: xiaoxuan@ukr.net.

Xiaoxuan Qin - PhD Student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3736-619X>, e-mail: xiaoxuan@ukr.net.

Цьонь Ганна Богданівна - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8561-8023>, e-mail: anndutka@ukr.net.

Hanna Tson - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Technical Mechanics and Agricultural Machinery Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8561-8023>, e-mail: anndutka@ukr.net.

Цьонь Олег Петрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1056-4697>, e-mail: tsonoleg@gmail.com.

Oleg Tson - Associate Professor, Candidate in Technical Sciences, Associate Professor of Automobiles Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1056-4697>, e-mail: tsonoleg@gmail.com.

Чумак Віталій Миколайович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1913-9371>, e-mail: vitaly.chumak33@gmail.com.

Vitalii Chumak - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1913-9371>, e-mail: vitaly.chumak33@gmail.com

Шаповал Степан Петрович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>, e-mail: stepan.p.shapoval@lpnu.ua.

Stepan Shapoval - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>, e-mail: stepan.p.shapoval@lpnu.ua.

Шепеленко Ігор Віталійович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1251-1687>, e-mail: kntucpfzk@gmail.com.

Ihor Shepelenko - Professor, Doctor of Technical Science, professor of the Department of Exploitation and repairing machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-1251-1687>, e-mail: kntucpfzk@gmail.com.

Шишацька Олена Володимирівна - кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теорії та технології програмування факультету комп'ютерних наук та кібернетики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-8791-8989>, e-mail: shyshatska@knu.ua.

Olena Shyshatska - PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Theory and Technology of Programming, Faculty of Computer Science and Cybernetics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8791-8989>, e-mail: shyshatska@knu.ua.

Шишацький Андрій Вікторович - асистент кафедри теорії та технології програмування факультету комп'ютерних наук та кібернетики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна, <https://orcid.org/0009-0000-5038-1110>, e-mail: ashyshatsky@knu.ua.

Andrii Shyshatskyi - Assistant at the Department of Theory and Technology of Programming, Faculty of Computer Science and Cybernetics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5038-1110>, e-mail: ashyshatsky@knu.ua.

Юр'єв Олександр Анатолійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6171-4842>, e-mail: yurolex7@gmail.com.

Oleksandr Yuriev - PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6171-4842>, e-mail: yurolex7@gmail.com.

Яцун Володимир Васильович - доцент, кандидат технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх машин та будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0245-0075>, e-mail: yatsun@i.ua.

Yatsun Volodymyr - Associate Professor, PhD in Mining machines (Candidate of Technical Sciences), Professor of Construction, Road Machines and Civil Engineering Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-0245-0075>, e-mail: yatsun@i.ua.

ЗМІСТ

Комп'ютерні науки

<i>О. С. Корнієнко, Н. О. Козуб, О. П. Доренський</i> Метод і технологічне рішення ШІ-сервісу адаптивного опитування інвестора для визначення індивідуального ризик-профілю	3
<i>М. В. Лахно</i> Контекстуальні характеристики цифрових слідів та їхній вплив на інформаційну безпеку університету	11
<i>М. В. Недьошев, В. В. Кириченко</i> Особливості роботи складних обчислювальних алгоритмів на прикладі перевірки гіпотези Полокка	23
<i>А. С. Приходько, Є. В. Малахов</i> Удосконалена математична модель оцінювання якості вебдодатків з відкритим кодом	30
<i>О. В. Шишацька, Л. П. Матійчук, А. В. Шишацький</i> Специфікація та верифікація формальної моделі системи реального часу із використанням TLA+	38

Комп'ютерна інженерія

<i>К. В. Будат, Л. Я. Мартинович</i> Синтез трійкових двохходових логічних функцій із використанням багатопорогового логічного елемента	45
<i>Б. Ю. Вінтенко, О. А. Смірнов, І. В. Миронець, Т. В. Смірнова, О. В. Коваленко, А. М. Мацуї</i> Модель шляхів отримання вхідних даних комп'ютерної інтелектуальної системи підтримки оперативного персоналу АЕС	52
<i>О. Б. Гуральник, О. С. Савенко</i> Оброблення критичної інформації в корпоративних мережах на основі комбінованого підходу DLP системи з системою виявлення ботнетів	63

Кібербезпека та захист інформації

<i>О. В. Лозинська, О. О. Марків, В. А. Висоцька</i> Метод виявлення розповсюджувачів дезінформації на основі графового представлення структури соціальної мережі	70
<i>Д. І. Прокопович-Ткаченко, Л. В. Рибальченко, Я. О. Деркач</i> Підвищення ефективності стеганографічних систем на основі глибоких автоенкодерів у контексті інформаційної безпеки	79

Прикладна механіка

І. В. Віштак, А. С. Мельченко

Вплив режимів шліфування на основні параметри якості поверхневих шарів газових підшипників та їх експлуатаційні властивості 87

І. Б. Гевко, А. Є. Дячун, Т. С. Дубиняк, О. Ю. Стібайло, Р. З. Золотий,

Дослідження операцій технологічного процесу виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків 99

І. Б. Гевко, Р. М. Рогатинський, Р. В. Комар, І. Г. Ткаченко, А. Б. Гупка

Технологічне проектування способів виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь транспортних труб..... 109

П. М. Єрємін, А. М. Кириченко, А. І. Гречка,

А. Р. Апаракін, Є. О. Ніщепенко

Сучасний стан та перспективи розвитку пристроїв для механічного подрібнення пластикових відходів 3D друку під час їх вторинної переробки 117

А. М. Кириченко, О. О. Кропивний, М. Е. Амірсеїдов

Просторова жорсткість робочого органа верстата з комбінованою кінематикою 127

В. М. Цимбал, Н. С. Карявкіна

Модернізація ливарного виробництва промисловими роботами та маніпуляторами..... 135

Галузеве машинобудування

А. О. Головатий, В. М. Чумак, Є. В. Манько, В. В. Аулін, Д. О. Кульова

Вдосконалення математичного моделювання машинобудівних технологій для смарт-підприємств в системі машинного зору 143

О. Л. Ляшук, О. П. Цьонь, О. А. Юр'єв, С. М. Паньків, Г. Б. Цьонь

Синтез гальмівних елементів муфт двосторонньої дії для гвинтових конвеєрів 160

І. В. Шепеленко, А. М. Красота, В. І. Гуцул, М. В. Красота

Обґрунтування конструкції пристрою для обробки кулачків розподільних валів фрикційно-механічним методом..... 169

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

А. В. Рухлов, Н. Ю. Рухлова, М. М. Воронін

Складники добового профілю електроспоживання вугільної шахти 177

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

В. К. Бондарчук, А. М. Мацуї, В. М. Каліч

Методи електромагнітного тестування та діагностики радіоантен покоління 5G 184

О. К. Дідик, О. М. Сербул, С. В. Тесля

Аналіз об'єкта керування для розробки системи автоматичної стабілізації завантаження молотарки зернозбирального комбайну 190

<i>С. Г. Ковальов, В. В. Аулін, А. В. Гриньків, Ю. Г. Ковальов</i> Моделювання стохастичної матриці станів виробничої лінії для оптимізації її експлуатаційної надійності за допомогою навчання з підкріпленням	195

<i>В. В. Смірнов, Н. В. Смірнова</i> Стек транспортних протоколів бездротової мережі Easy Net Everywhere	204

Будівництво та цивільна інженерія

<i>О. О. Давиденко, М. В. Гаркуша, І. А. Козарчук, П. О. Казак, Я. О. Цапок</i> Методи визначення технічного стану водопропускної труби з аналізом необхідних ремонтних робіт	214

<i>С. Й. Мисак, С. П. Шаповал, М. Я. Кузнецова</i> Аналіз ефективності інноваційного гібридного теплового фотоелектричного колектора	224

<i>В. А. Настоящий, Д. Ю. Артеменко, О. А. Кислун, В. В. Дарієнко, І. О. Скриннік</i> Обґрунтування конструкції котка для ущільнення свіже підготовленого ґрунту майданчика під майбутнє будівництво	232

<i>Г. Д. Портнов, В. В. Дарієнко, В. В. Пукалов, В. В. Яцун, С. А. Гудзь</i> Модернізація сталевих ферм із труб квадратного та прямокутного перерізу.....	241

<i>І. О. Скриннік, М. О. Федотова, В. В. Дарієнко, В. В. Яцун, Д. Ю. Артеменко</i> Дослідження технологічних рішень при зведенні залізобетонних будівель та споруд будівництва	250

<i>І. О. Скриннік, М. О. Федотова, В. В. Дарієнко, В. В. Яцун</i> Застосування палевого кріплення ґрунтів при виконанні технології земляних робіт в незв'язних та сипучих ґрунтах	256

Агроінженерія

<i>О. Д. Деркач, Д. О. Макаренко, Є. С. Муранов, В. В. Сукачов, О. Ю. Береза</i> Обґрунтування складу полімерно-композитного матеріалу конструкційного призначення для трибоспрямих сільськогосподарської техніки	260

Автомобільний транспорт

<i>І. Б. Гевко, В. О. Тесля, М. Д. Сіправська, Б. Р. Гевко, Р. В. Хорошун</i> Нові технології для підвищення безпеки дорожнього руху на пішохідних переходах та регульованих перехрестях	268

<i>Д. О. Кульова, С. О. Магопєць, О. М. Лівіцький</i> Безпека дорожнього руху в Україні: оцінювання ризиків і перспективи цифровізації.....	278

<i>Е. Д. Ладигенський, В. П. Петленко, А. В. Гриньків</i> Підвищення рівня екологічності транспортних перевезень на засадах інтелектуалізації транспортних систем	286

<i>О. О. Матвієнко, В. В. Аулін</i> Класифікація типів сигналів та методів машинного навчання для інтелектуальної оцінки технічного стану мобільних машин підприємств агропромислового виробництва	298
<i>Т. М. Надич, В. В. Аулін, А. В. Гриньків, В. В. Слонь</i> Методи і заходи удосконалення системи технічного сервісу вантажних автомобілів на основі кіберфізичного підходу і розробки науково-технічної документації його операцій.....	313
<i>М. А. Подригало, О. С. Полянський, Є. О. Дубінін, М. В. Краснокутський, В. А. Литвин</i> Раціональне управління динамікою повороту задньопривідного автомобіля з мотор-колесами.....	328
<i>В. П. Сахно, М. М. Маяк, В. П. Онищук, А. С. Котенко, С. В. Стельмащук</i> Вплив компонувальних і масових параметрів автомобіля і причепа на стійкість руху малотоннажного автопоїзда	335
<i>А. А. Сергійчук, В. В. Аулін, А. В. Гриньків, А. В. Сергійчук</i> Забезпечення належного рівня якості надання послуг підприємствами технічного сервісу колісних транспортних засобів проведенням їх акредитації	348
<i>Л. А. Тарандушка, І. П. Тарандушка</i> Розробка морфологічної матриці системи нанесення лакофарбового покриття для забезпечення можливості прогнозування якості відновлювального лакофарбового покриття на кузовних деталях автомобіля	364
<i>С. Ю. Тищенко, В. В. Аулін, А. В. Гриньків</i> Виявлення типових відмов елементів автомобілів групи Renault та обґрунтування вибору запасних частин	371
<i>С. В. Харченко, В. Г. Байцан, Д. П. Косякевич, С. В. Лисенко</i> Підвищення ефективності використання парків транспортних та технологічних машин шляхом вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту	382
Транспортні технології	
<i>Цинь Сяосюань, Є. В. Любий</i> Аналіз існуючих методів формування моделей потреб пасажирів у пересуваннях.....	394
Інформація про авторів.....	410

CONTENT

Computer Science

<i>Oleksandr Korniienko, Nataliia Kozub, Oleksandr Dorenskyi</i> Method and Technological Solution of an AI-Based Adaptive Investor Survey Service for Determining an Individual Risk Profile.....	3
<i>Miroslav Lakhno</i> Contextual Characteristics of Digital Footprints and Their Impact on University Information Security	11
<i>Maksym Nedoshev, Viktor Kyrychenko</i> Peculiarities of the Operation of Complex Computational Algorithms using the Example of Testing the Pollock Hypothesis.....	23
<i>Andriy Prykhodko, Eugene Malakhov</i> An Improved Mathematical Model for Assessing the Quality of Open Source Web Applications.....	30
<i>Olena Shyshatska, Liubomyr Matiichuk, Andrii Shyshatskyy</i> Specification and Verification of a Formal Model for a Real-Time System Using TLA+	38

Computer Engineering

<i>Kateryna Budat, Larysa Martynovych</i> Software Implementation of the Synthesis of Ternary Two-Input Logic Functions	45
<i>Borys Vintenko, Oleksii Smirnov, Iryna Myronets, Tetiana Smirnova, Oleksandr Kovalenko, Anatolii Matsui</i> Model of Ways to Obtain Input Data for a Computer Intelligent System to Support Operational Personnel of a Nuclear Power Plant	52
<i>Oleksandr Huralnyk, Oleg Savenko</i> Processing Critical Information in Corporate Networks Based on a Combined Approach of a DLP System with a Botnet Detection System	63

Cybersecurity and Information Protection

<i>Olga Lozynska, Oksana Markiv, Victoria Vysotska</i> A Method for Detecting Disinformation Spreaders Based on a Graph Representation of the Social Network Structure	70
<i>Dmytro Prokopovych-Tkachenko, Liudmyla Rybalchenko, Yaroslav Derkach</i> Steganographic Methods in Information Security	79

Applied Mechanics

<i>Inna Vishtak, Andrii Melchenko</i> The Influence of Grinding Modes on the Main Quality Parameters of Surface Layers of Gas Bearings and their Operational Properties	87

<i>Ivan Hevko, Andrii Diachun, Taras Dubynyak, Oleg Stibailo, Roman Zoloty</i> Research of Technological Process Operations for Manufacturing Shredder Knives on Screw Spirals	99
<i>Ivan Hevko, Roman Rohatynskyi, Roman Komar, Igor Tkachenko, Andrii Gypka</i> Technological Design of Methods for Manufacturing U-Shaped Helical Surfaces of Transport Pipes.....	109
<i>Pavlo Yeromin, Andrii Kyrychenko, Andrii Hrechka, Anton Aparakin, Evgen Nishchemenko</i> Current Status and Development Prospects of Devices for Mechanical Crushing of 3D Printing Plastic Waste During its Recycling.....	117
<i>Andrii Kyrychenko, Mahomed Amirseidov, Oleksandr Kropivny</i> Spatial Stiffness of the End Effector of a Machine Tool with Combined Kinematics	127
<i>Bohdan Tsymbal, Nataliya Karyavkina</i> Modernisation of Foundry Production with Industrial Robots and Manipulators	135

Industrial Machinery Engineering

<i>Artem Holovaty, Viktor Aulin, Vitalii Chumak, Yehor Manko, Daria Kuleva</i> Improving Mathematical Modeling of Engineering Technologies for Smart Enterprises in a Machine Vision System.....	143
<i>Oleg Lyashuk, Oleg Tson, Oleksandr Yuriev, Serhiy Pankiv, Anna Tson</i> Synthesis of Double-Action Brake Elements for Screw Conveyors.....	160
<i>Ihor Shepelenko, Artem Krasota, Vasiliy Gutsul, Mykhailo Krasota</i> Substantiation of the Design of a Device for Machining Camshaft Cams by the Friction-Mechanical Method.....	169

Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics

<i>Rukhlov Artem, Nataliia Rukhlova, Mykhailo Voronin</i> Components of the Daily Power Consumption Profile of a Coal Mine.....	177

Automation and Computer Integrated Technologies

<i>Viktor Bondarchuk, Anatolii Matsui, Viktor Kalich</i> Analysis of Electromagnetic Testing and Defect Detection Tools for 5G Generation Radio Antennas	184
<i>Oleksandr Didyk, Oleksandr Serbul, Serhiy Teslya</i> Analysis of the Control Object for the Development of a System for Automatic Stabilization of the Loading of the Threshing Machine of a Combine Harvester	190
<i>Serhii Kovalov, Viktor Aulin, Andriy Grynkiv, Yuriy Kovalov</i> Modeling the Stochastic State Matrix of a Production Line for Optimize its Operational Reliability Using Reinforcement Learning.....	195
<i>Volodymyr Smirnov, Nataliia Smirnova</i> Easy Net Everywhere Wireless Network Transport Protocol Stack	204

Construction and Civil Engineering

<i>Oleksandr Davydenko, Mykola Harkusha, Igor Kozarchuk, Pavlo Kazak, Yaroslav Tsapko</i> Methods for Determining the Technical Condition of a Culvert With an Analysis of the Necessary Repair Work	214
<i>Stepan Mysak, Stepan Shapoval, Marta Kuznetsova</i> Analysis of the Efficiency of an Innovative Hybrid Thermal Photovoltaic Collector.....	224
<i>Vladyslav Nastoiashchyi, Dmytro Artemenko, Oleh Kyslun, Viktor Dariienko, Ivan Skrynnik</i> Rationale for the Design of a Roller for Compacting Freshly Prepared Soil on a Site for Future Construction	232
<i>Hennadii Portnov, Viktor Dariienko, Pukalov Viktor, Volodymyr Yatsun, Serhii Hudz</i> Modernization of Steel Trusses Made of Square and Rectangular Hollow Sections	241
<i>Ivan Skrynnik, Marianna Fedotova, Victor Darienko, Dmytro Artemenko</i> Research of Technological Solutions in the Construction of Reinforced Concrete Buildings and Structures in Construction.....	250
<i>Ivan Skrynnik, Marianna Fedotova, Victor Darienko, Volodymyr Yatsun</i> Application of Soil Anchoring when Performing Earthworks Technology in Loose and Loose Soils	256

Agroengineering

<i>Oleksii Derkach, Dmytro Makarenko, Yevhen Muranov, Valerii Sukachov, Olena Bereza</i> Justification of the Composition of a Polymer Composite Material for Structural Purposes for Tribocouplings of Agricultural Machinery	260

Road Transport

<i>Ivan Hevko, Volodymyr Teslya, Maria Sipravska, Bogdan Hevko, Roman Khoroshun</i> New Technologies for Enhancing Road Traffic Safety at Pedestrian Crossings and Signalized Intersections.....	268
<i>Daria Kulova, Sergiy Mahopets, Oleksandr Livitskyi</i> Road Safety in Ukraine: Risk Assessment and Digitalization Prospects.....	278
<i>Eduard Ladyzhenskyi, Volodymyr Petlenko, Andrii Hrynkyv</i> Increasing the Level of Environmental Friendliness of Transportation Based on the Intellectualization of Transport Systems	286
<i>Oleksandr Matviienko, Viktor Aulin</i> Classification of Signal Types and Machining Methods for Intelligent Assessment of the Technical Mill of Mobile Machines for Agro-Industrial Production	298

<i>Taras Nadych, Viktor Aulin, Andrii Hrynkiv, Viktor Slon</i> Methods and Measures for Improving the Technical Service System of Trucks Based on a Cyber-Physical Approach and the Development of Scientific and Technical Documentation of its Operations	313
<i>Mykhailo Podryhalo, Olexandr Polyanskyi, Yevgen Dubinin, Maxim Krasnokutsky, Vitaly Lytvyn</i> Rational Control of the Turning Dynamics of a Rear-Wheel Drive Vehicle with Motor Wheels.....	328
<i>Volodymyr Sakhno, Mykola Mayak, Vasyl Onyshchuk, Andrii Kotenko, Stanislav Stelmashchuk</i> Influence of Layout and Mass Parameters of a Vehicle and Trailer on the Stability of a Light-Duty Road Train.....	335
<i>Andrii Serhiichuk, Viktor Aulin, Andrii Hrynkiv, Andrii Serhiichuk</i> Ensuring the Proper Level of Quality of Services Provided by Wheeled Vehicle Technical Service Enterprises by Conducting Their Accreditation	348
<i>Liudmyla Tarandushka, Ivan Tarandushka</i> Development of a Paint Application System Morphological Matrix for Enable Prediction of Restoration Paint Coating Quality on Car Body Parts	364
<i>Serhii Tyshchenko, Viktor Aulin, Andrii Hrynkiv</i> Identification of Typical Failures of Renault Group Vehicle Components and Justification of Spare Parts Selection	371
<i>Serhii Kharchenko, Viktor Baitsan, Dmytro Kosiakevych, Serhii Lysenko</i> Increasing the Efficiency of Using Fleets of Transport and Technological Vehicles by Improving the Maintenance and Repair System	382
Transport Technologies	
<i>Xiaoxuan Qin, Yevhen Liubyi</i> Analysis of Existing Methods of Forming Models of Passenger Travel Needs	394
Information About Authors	410

Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії. Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело

Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

Анотація українською мовою – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

Анотація англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

Структура анотацій:

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

Структура основного тексту статті:

1. Постановка проблеми.
2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.
3. Постановка завдання (мета статті).
4. Виклад основного матеріалу.
5. Висновки і перспективи подальших досліджень.

Схема організації матеріалу статті:

1. Тематика*
2. УДК
3. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
4. Місце роботи, місто, країна. e-mail
5. Назва статті.
6. Анотація і ключові слова мовою статті.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури.
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською (українською) мовою.
11. Інформація про авторів.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Turnitin

Адреса для надсилання: zbiryk_tech@kntu.kr.ua

*** – 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія, 125 Кібербезпека, 131 Прикладна механіка, 132 Матеріалознавство, 133 Галузеве машинобудування, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 192 Будівництво та цивільна інженерія, 208 Агроінженерія, 274 Автомобільний транспорт, 275 Транспортні технології (за видами)**

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

В и п у с к 11(42)
Частина II

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко, О.П. Доренський

Комп'ютерна верстка О.П. Доренський

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.
25006, м. Кропивницький, вул. Шевченка, 25
тел./факс 24-35-53*

Підписано до друку 26.05.2025р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 54,75
Тираж 300 прим. Зам. № 0856