

**ISSN 3083-5704 (Online)**

# **Challenges and Issues of Modern Science**

**Scientific peer-reviewed journal**



**<https://cims.fti.dp.ua/j>**

**Volume 3  
2024**

**Publication Frequency: Semiannual  
Established: June 2023**

**Dnipro, UA**



*The content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.*

---

UDC 004+005+502/504+620+621+628+629+658+681(051+082)

The journal *Challenges and Issues of Modern Science* is dedicated to an in-depth exploration of contemporary trends and global challenges in the scientific domain. The articles in this publication reflect the collaborative efforts of experts, researchers, and practitioners from various disciplines who have united to address the complex problems facing modern science. Through comprehensive analyses, empirical studies, and theoretical approaches, these contributions aim to shed light on emerging trends, propose innovative solutions, and foster dialogue on key issues shaping the future of science and technology. By encompassing the latest scientific achievements and ideas, the journal serves as a valuable resource for scholars and professionals, contributing to the advancement of knowledge and its application in relevant scientific fields.

The scope of the journal covers a wide range of topics and disciplines related to modern science. These include, but are not limited to: Aerospace Vehicles, Engines, Energy and Thermotechnics, Innovative Technologies in Mechanical Engineering, Structural and Functional Materials, Integrated Automation Technologies and Robotics, Control Systems, Telecommunications and Navigation, Information Technology and Cybersecurity, Project Management and Leadership, as well as Ecology, Industrial, and Environmental Safety. The journal welcomes empirical studies, theoretical frameworks, and practical applications that contribute to understanding and resolving contemporary challenges in science.

*This Journal was recommended for publication by the Academic Council of the Faculty of Physics and Technology at the Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA (Minutes No. 3 dated November 19, 2024).*

By Resolution No. 2633 of the National Council on Television and Radio Broadcasting dated August 29, 2024, the journal *Challenges and Issues of Modern Science* has been included in the Registry of Online Media as an electronic periodical academic multilingual publication, scientific journal. Media Identifier: R40-05435.

**Legal Address for Editorial Control** (Official address for correspondence):

Oles Honchar Dnipro National University  
49045, 72 Nauky Ave, Dnipro, Ukraine  
Email: [cdep@dnu.dp.ua](mailto:cdep@dnu.dp.ua)  
Website: <https://dnu.dp.ua>  
ROR ID: <https://ror.org/00qk1f078>

**Editorial Office Address:**

Oles Honchar Dnipro National University  
49107, 12 Naukova St, Dnipro, Ukraine  
Email: [conf@fti.dp.ua](mailto:conf@fti.dp.ua)  
Website: <https://cims.fti.dp.ua/j>

---

ISSN 3083-5704



9 773083 570241

---

Signed for print: November 26, 2024.  
Format: 60×84/16. Printing: digital. Cond. print sheets: 23.9. Fonts: Times New Roman, Arial, Arial Black. Circulation: electronic publication.

---

## Journal Editorial Board

### Editor-in-Chief

Dr. Sc., Prof. *Anatolii Sanin* (Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA).

### Deputy Editor-in-Chief / Managing Editor

Cand. Sc., Assoc. Prof. *Yurii Tkachov* (Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA).

### Lead Domain Editors

Dr. Sc., Prof. *Serhii Aleksieienko* (Dnipro University of Technology: Dnipro, UA). Dr. Sc., Prof. *Tetiana Grynko*; Dr. Sc., Prof. *Tetiana Rusakova*; Dr. Sc., Prof. *Serhii Zirka* (Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA).

### Managing Editor

Sr. Lect. *Yuliia Stasiuk* (Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA)

### Associate Editors

Cand. Sc., Assoc. Prof. *Svitlana Antonenko*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Natalya Ashhepkova*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Valerii Bucharskyi*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Igor Gomilko*; Dr. Sc., Prof. *Volodymyr Habrinets*; Dr. Sc., Prof. *Liudmyla Knysh*; Dr. Sc., Prof. *Nataliya Krasnikova*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Oleksandr Krupskyi*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Olena Levytska*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Volodymyr Lipovskiy*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Dmytro Mozghovyi*; Dr. Sc., Prof. *Hanna Niameshchuk*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Roman Pavlov*; Dr. Sc., Prof. *Galyna Sokol* (Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Maryna Riabokin* (Higher Education Institution Kyiv Institute of Business and Technology LLC: Kyiv, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Yuliia Verheliuk* (State Tax University: Irpin, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Vadym Polishchuk* (Lutsk National Technical University: Lutsk, UA). PhD Cand. *Michele Oppioli* (University of Turin: Turin, IT). PhD, Assoc. Prof. *Marin Georgiev*; PhD, Dr. Sc., Prof. *Venelin Terziev* (Black Sea Institute: Bourgas, BG). Dr. Sc., Prof. *Olena Chukurna* (State University of Intellectual Technologies and Communications: Odesa, UA). PhD, Prof. *Rohit Bansal* (Vaish College of Engineering: Rohtak, Haryana, IN). PhD *Silvia Costa Pinto* (Fernando Pessoa University: Porto, PT). PhD, Assoc. Prof. *Radostin Vazov* (Sofia University "St. Kliment Ohridski": Sofia, BG). PhD, Assoc. Prof. *Ouail El Imrani* (Abdelmalek Essaâdi University: Tétouan, MA). PhD, Assoc. Prof. *Bilal Al-Ahmad* (St. Cloud State University: Saint Cloud, Minnesota, US). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Serhii Veretiuk* (Polissia National University: Zhytomyr, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Vita Kashtan*; Dr. Sc., Prof. *Yevgen Kotukh* (Dnipro University of Technology: Dnipro, UA). PhD, Assoc. Prof. *Farrukh Dekhkonov* (Namangan State University: Namangan, ZU). Dr. Hab. Inż., Prof. *Andrii Milenin* (AGH University of Krakow: Krakow, PL). Dr. Sc., Prof. *Ganna Kononenko* (Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine: Dnipro, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Natalia Saienko* (National University of Civil Defense of Ukraine: Kharkiv, UA). PhD, Sr. Researcher *Pavlo Krot* (Wroclaw University of Science and Technology: Wroclaw, PL). PhD, Prof. *Artem Andrianov* (University of Brasília: Brasília, Distrito Federal, BR). PhD, Sr. Researcher *Serhii Adzhamskyi* ('Transmag' Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine: Dnipro, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Oleksii Kulyk* (A. M. Makarov National Youth Aerospace Education Center: Dnipro, UA). Cand. Sc., Sr. Researcher *Serhii Dolhopolov* (The Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine: Dnipro, UA). Dr. Techn., App Eng. *Dennis Albert* (OMICRON electronics GmbH: Klaus, AT). Dr. Sc., PhD, Head of R&I *Stan Zurek* (Megger (United Kingdom): Dover, GB). PhD, Researcher *Reagan Jean Jacques Molu* (University of Douala: Douala, CM).

Cand. Sc., Assoc. Prof. *Yuliia Kulia* (Kharkiv National University of Radio Electronics: Kharkiv, UA). Dr. Sc., Assoc. Prof. *Teodora Petrova* (Trakia University: Stara Zagora, Stara Zagora, BG). Dr. Sc., Prof. *Ganna Kalashnyk* (Flight Academy of the National Aviation University: Kropyvnytskyi, UA). Dr. Sc., Sr. Researcher *Olha Medvedieva* (M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Dnipro, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Oleksandr Berlov* (Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture at the Ukrainian State University of Science and Technologies: Dnipro, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Polina Mashykhina* (Ukrainian State University of Science and Technologies: Dnipro, UA). Dr. Sc., Prof. *Mykola Billaiev* (Ukrainian State University of Science and Technologies: Dnipro, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Nataliia Tkachuk* (T. H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium": Chernihiv, UA). Dr. Sc., Prof. *Liliya Frolova* (Ukrainian State University of Chemical Technology at the Ukrainian State University of Science and Technologies: Dnipro, UA).

### Assistant Editors

PhD, Sr. Researcher *Oleh Bondarenko* (Institute of Applied Control Systems of the NAS of Ukraine: Kyiv, UA). PhD Cand. *Vladyslav Proroka*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Viktor Voloshko* (Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA).

### Language Review Editors

Cand. Sc., Assoc. Prof. *Olha Novikova*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Irina Suima* (Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA).

## Contributing Reviewers

Cand. Sc., Assoc. Prof. *Svitlana Antonenko*; Sr. Lect. *Volodymyr Bielikov*; PhD Cand. *Oleksandr Dobrodomov*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Olena Dolzhenkova*; Grad Student *Daniil Doroshenko*; Dr. Sc., Prof. *Tetiana Grynko*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Tetiana Hvinashvili*; Dr. Sc., Prof. *Roman Ivanov*; Dr. Sc., Prof. *Liudmyla Knysht*; Dr. Sc., Prof. *Nataliya Krasnikova*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Oleksandr Krupskyi*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Tetiana Labutkina*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Olena Levytska*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Volodymyr Lipovskyi*; Dr. Sc., Prof. *Hanna Niameshchuk*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Olha Novikova*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Olha Ohdanska*; Cand. Sc., Assoc. Prof., *Roman Pavlov*; PhD Cand. *Vladyslav Proroka*; Dr. Sc., Prof. *Tetiana Rusakova*; Dr. Sc., Prof. *Anatolii Sanin*; Sr. Lect. *Yuliia Stasiuk*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Yurii Tkachov*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Yuliya Voitenko*; Cand. Sc., Assoc. Prof. *Olena Zolotko* (Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA). Dr. Sc., Prof. *Ruslana Balabai* (Kryvyi Rih State Pedagogical University: Kryvyi Rih, UA). PhD, Sr. Researcher *Oleh Bondarenko* (Institute of Applied Control Systems of the NAS of Ukraine: Kyiv, UA). Cand. Sc., Sr. Lect. *Roman Duban* (Kharkiv University of Technology "STEP": Kharkiv, UA). PhD Cand., Researcher *Zariana Halchenko* (M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Dnipro, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Vita Kashtan* (Dnipro University of Technology: Dnipro, UA). Dr. Sc., Prof. *Ganna Kononenko* (Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine: Dnipro, UA). Cand. Sc., Assoc. Prof. *Oleksii Kulyk* (A. M. Makarov National Youth Aerospace Education Center: Dnipro, UA). Dr. Sc., Prof. *Yurii Mitkov* (Ukrainian State University of Science and Technologies: Dnipro, UA).



## Contents

<b>Homogeneous Model in Finite Element Analysis for Natural Frequency Calculation of Axisymmetric Shells</b> <i>Volodymyr Lipovskyi</i> .....	8–14
<b>Analysis of the Possibilities for Developing an Unmanned Aerial Vehicle for Radiation Monitoring</b> [in Ukrainian] <i>Volodymyr Palamarchuk, Oleksandr Pylypenko</i> .....	15–22
<b>Evolution of Multiple Launch Rocket Systems from Early Rockets to HIMARS and Beyond</b> <i>Mykola Bondarenko, Volodymyr Habrinets, Mykhailo Vorobei</i> .....	23–34
<b>Design and Optimization of a Hybrid Gas Generator for Hydrogen Peroxide Tank Pressurization</b> <i>Mykhailo Vorobei, Mykola Bondarenko</i> .....	35–47
<b>Mathematical model for heat transfer in variable thickness fins for rocket engines</b> <i>Volodymyr Sliusariev, Valerii Bucharskyi</i> .....	48–54
<b>Design Analysis and Calculation Methods for Furnace Oil Burners in Heating Systems</b> [in Ukrainian] <i>Ihor Tokarskyi, Volodymyr Habrinets</i> .....	55–61
<b>Application of computer-integrated technologies in rocket engine design</b> [in Ukrainian] <i>Volodymyr Sukachevskyi, Vasyl Shevtsov</i> .....	62–73
<b>Scientific and Technical Texts: Translation Aspects in Electrical and Computer Engineering</b> <i>Irina Suima</i> .....	74–82
<b>Concept of Data Model for Structural Elements in Applied Mechanics</b> [in Ukrainian] <i>Oleh Yushkevych</i> .....	83–92
<b>The influence of the cooling rate on the phase composition and properties of multicomponent AlCoCrFeNiV alloys with the addition of Mn and Si</b> [in Ukrainian] <i>Oleksandr Kushnerov, Valerii Bashev, Serhii Riabtsev</i> .....	93–99
<b>Development of an automated system for controlling the temperature regime of baking bakery products using a fuzzy controller</b> [in Ukrainian] <i>Oleksii Razzhyvin, Anastasiia Liuta, Oleksandr Simkin, Artem Zaliatov</i> .....	100–107
<b>Methodology for Selecting the Discretization Step of a Model in Information and Measurement Technologies</b> [in Ukrainian] <i>Valerii Mazurenko</i> .....	108–112
<b>Using micro:bit for building distributed sensor networks in robotic systems</b> <i>Roman Duban, Yurii Yurko</i> .....	113–119

<b>Selection of Launch Vehicle Motion Model Parameters for Spacecraft Insertion into Circular Orbits</b> [in Ukrainian] <i>Ruslan Keba, Anatolii Kulabukhov</i> .....	120–127
<b>Integration of Non-Stationary Optimal Control Systems with Delay and an Unstable Spectrum</b> [in Ukrainian] <i>Petro Samusenko, Tetiana Novik, Mykola Rashevskiy</i> .....	128–132
<b>Methodology of satellite monitoring of deforestation based on Sentinel-2A/B data</b> [in Ukrainian] <i>Dmytro Mozghovyi, Volodymyr Korchynskiy, Dmytro Svyarenko</i> .....	133–143
<b>Vectorization of calculations for code optimization in the Python programming language</b> [in Ukrainian] <i>Oleksii Zemlianyi, Oleh Baibuz</i> .....	144–149
<b>Training convolutional neural network models for object, scene and context recognition in images</b> [in Ukrainian] <i>Roman Orlov, Serhii Taboranskyy</i> .....	150–156
<b>Cyber security of critical infrastructure: challenges of innovation and threats of digital technologies</b> [in Ukrainian] <i>Anna Andrukh, Yurii Yurchenko</i> .....	157–166
<b>Internet of Things (IoT) technologies: features, development prospects and potential threats</b> <i>Daria Margaza, Yurii Yurchenko</i> .....	167–172
<b>Prediction of Network Threats and Attacks by Mathematical Simulation</b> <i>Daniil Doroshenko</i> .....	173–179
<b>Analysis of the leader's role in ensuring project success: style, adaptability, and emotional intelligence</b> [in Ukrainian] <i>Daniil Abramov, Yuliia Stasiuk</i> .....	180–187
<b>Emotional intelligence as a factor in successful team management</b> [in Ukrainian] <i>Inna Voloshyna, Oleksandr Krupskiy</i> .....	188–195
<b>Digital twin as a tool of the real-time enterprise management mechanism</b> <i>Oleksandr Bazyk, Tetiana Grynko</i> .....	196–203
<b>Financial and economic consequences of the war for Ukraine</b> <i>Olena Lytvyn</i> .....	204–213
<b>Role of Emotional Intelligence and Professional Culture in the Development of Higher Education Institutions</b> [in Ukrainian] <i>Yuliia Stasiuk, Iryna Vainilovych, Andrii Kobchenko</i> .....	214–222
<b>Theoretical substantiation of the system of factors influencing the agricultural development: the Ukrainian context</b> [in Ukrainian] <i>Roman Ivanov, Yurii Hurtovyi</i> .....	223–235

<b>Building an effective system of information and analytical support for enterprise management: tasks and challenges</b> [in Ukrainian] <i>Stanislav Svir</i> .....	236–242
<b>Leadership models in managing cross-cultural teams</b> [in Ukrainian] <i>Sofiiia Salamanina, Hanna Niameshchuk</i> .....	243–249
<b>The multifaceted nature of tokens in entrepreneurial ecosystems: new horizons of digital asset axiology</b> [in Ukrainian] <i>Roman Pavlov, Tetiana Pavlova</i> .....	250–258
<b>Analysis of E-Commerce as a Driver of Globalization: Business Opportunities and Risks</b> [in Ukrainian] <i>Valeriia Vorobiova, Oleksandr Krupskyi</i> .....	259–264
<b>Analysis of the conditions for starting a small business in the beauty industry: the case of the city of Dnipro</b> [in Ukrainian] <i>Yanina Kolodkina, Oleksandr Krupskyi</i> .....	265–273
<b>Multi-purpose optimization of outsourcing solutions in a virtual enterprise</b> [in Ukrainian] <i>Tetiana Grynko, Serhii Dulieпов</i> .....	274–278
<b>Microplastics in agricultural soils: sources and microbial remediation approaches</b> <i>Nataliia Tkachuk, Liubov Zelena, Yaroslav Novikov</i> .....	279–287
<b>Assessment of air pollutants when burning alternative fuels</b> <i>Olena Levytska, Artem Sikorsky</i> .....	288–293
<b>Increasing environmental safety by dedusting agglomeration gases</b> [in Ukrainian] <i>Yuliia Voitenko</i> .....	294–298
<b>Possibility of using the territories of Kryvyi Rih disturbed by mining operations for wind energy development</b> [in Ukrainian] <i>Olha Medvedieva, Zariana Halchenko, Oleksii Demchenko</i> .....	299–304
<b>Assessment of the impact of Russia's armed aggression on the state of atmospheric air in Ukraine</b> [in Ukrainian] <i>Olena Dolzhenkova, Diana Nazarenko</i> .....	305–311
<b>Forecasting Sulfur Dioxide Levels in the Atmosphere from Stationary and Mobile Sources of Pollution</b> [in Ukrainian] <i>Tetiana Rusakova</i> .....	312–319

# Homogeneous Model in Finite Element Analysis for Natural Frequency Calculation of Axisymmetric Shells

Volodymyr Lipovskyi 

**Purpose.** The article aims to provide practical recommendations for calculating natural frequencies in axisymmetric shells using finite element methods. It focuses on the need to develop a simplified model that can be used in any modern finite element software package. The study analyzes the impact of the simplified homogeneous model on the deviation and error of natural frequencies compared to real structures. **Design / Method / Approach.** The research is based on creating a simplified shell geometry by determining parameters such as shell thickness and density. These parameters are derived under the condition of equivalence in the moment of inertia and mass of the cross-sectional element. These parameters can vary along the height of the shell. **Findings.** The natural frequencies of the experimental shell with complex geometry were calculated and compared with those of the simplified model. The deviations and errors in the calculated frequencies were determined. It was demonstrated that the simplified model allows the calculation of natural frequencies with a deviation of no more than 1% from the experimental model, while significantly reducing computation time and the required computer resources. **Theoretical Implications.** The research expands the understanding of challenges in calculating the natural frequencies of complex objects using finite element methods under limited computational resources. **Practical Implications.** Practical recommendations are provided for engineers and designers when performing modeling tasks in the mechanics of deformable solid bodies. **Originality / Value.** The article presents an original analysis of a real case where a simplified model was implemented to determine the natural harmonics of a liquid rocket engine nozzle, making it a valuable tool for studying complex structures. **Research Limitations / Future Research.** The study is limited to the analysis of determining the natural frequencies of axisymmetric shells and does not cover all possible geometric features. Future research may focus on developing simplified models based on the equivalence of stiffness and mass parameters. **Article Type.** Case study, practical article.

## Keywords:

natural frequencies, finite element method, axisymmetric shells, simplified homogeneous model, shell geometry, computation time reduction

## Contributor Details:

Volodymyr Lypovskyi, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [lealvi@ukr.net](mailto:lealvi@ukr.net)



Thin-walled shell structures are important structural elements in many engineering fields. These structures are prone to resonance at their natural frequencies under dynamic loads, making the task of determining the natural frequencies relevant. This is particularly relevant when solving nonlinear dynamics problems. To solve nonlinear dynamic problems, semi-analytical methods are most often used, which involve low-dimensional analytical-numerical models with a small number of degrees of freedom. Such approaches are presented in the works of (Popov et al., 1998), (Jansen, 2002), (Amabili, 2008) and (Strozzi & Pellicano, 2013). The use of the spectral element method (SEM) for determining the natural frequencies in shells is presented in the work (Mukherjee et al., 2021). The simplification of the problem by replacing the shell element with a beam element is presented in the work of (Cela et al., 2000). When using the finite element method, the problem is also solved using reduced-order elements (Rahman et al., 2011). However, the analysis of transient processes based on finite elements is computationally expensive. In the work of Dey and Ramachandra (Dey & Ramachandra, 2015) using the example of a composite cylindrical shell under pulsating load, it was demonstrated that it is not possible to obtain a solution to the problem using the finite element method.

There is a contradiction between the resources available to the researcher and the accurate development of the model for the part being studied in all finite element numerical modeling packages (Abaqus, 2009; COMSOL, 2023; Hexagon, 2022). On one hand, the quality of the modeling and result itself depends heavily on the number and quality parameters of the created finite elements. On the other hand, computer resources in some cases happen to be insufficient for operations with the matrices of the finite element model in case of complex geometry of the part. This problem requires not only significant resources from the workstation but also a lot of time to solve on condition that the model is built. Moreover, there is a possibility that the problem cannot be solved with the tools and resources available to the researcher. This is especially true for all tasks related to the calculation of natural frequencies of parts in the context of solid mechanics problems. Such tasks are always resource-intensive and require a significant amount of computational memory and time. A researcher without a sufficiently powerful workstation always needs to find a compromise solution. This paper examines one such approach, namely the use of a homogeneous model for parts with complex geometry. The potential of this approach is demonstrated using the example of calculating the natural frequencies of a supersonic part of rocket engine nozzle, which has many small cooling channels. A numerical comparison of the results obtained for both the complex geometry of the part and the simplified one is performed. Recommendations are provided for developing such homogeneous models for problems involving the determination of natural frequencies of symmetric shell structures.

## **Tasks and objectives**

The objectives of the paper are to simplify the complexity of part's geometry, build a finite element model that enables creation of a high-quality model and

further solution of the problem of determining the natural frequencies with the use of lesser computational resources.

## Materials and methods

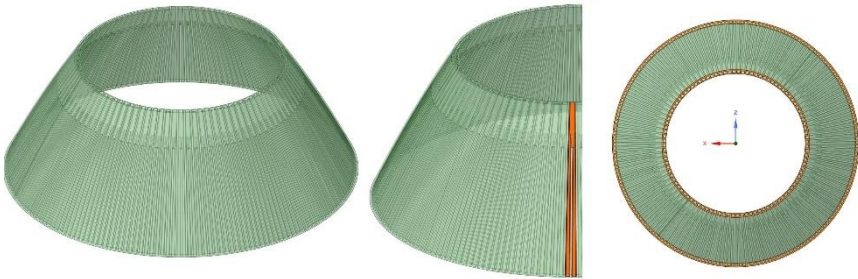
The task of determining the natural frequencies of any part depends on the distribution of mass and stiffness across the object under analysis. Therefore, when developing an alternative model, the geometry is simplified while maintaining the equivalence of the design's mass and stiffness. In this process, a homogeneous equivalent simplified model is used. This approach is not universal and is implemented for axisymmetric shell structures with complex geometry. The studied shell is replaced with a simplified homogeneous model variant, which parameters are determined according to the following algorithm:

1. The geometry of the shell's cross-section is analyzed, considering possible variations in height. The symmetrically repeating part of the cross-section is identified.

2. The center of gravity of this part is located. If the geometry is complex, it is replaced with a combination of simple geometric elements. For this cross-section, its area and momentum of inertia are calculated.

3. The shell with a complex cross-section is replaced by a homogeneous model, with its thickness and density determined based on the equivalence of the momentum of inertia and mass.

This algorithm is demonstrated using the example of determining the natural frequencies of a liquid rocket engine nozzle, which has a complex geometry of small cooling channels. Main view of the nozzle is shown in Fig. 1.



**Figure 1 – Main view of the nozzle (Source: author)**

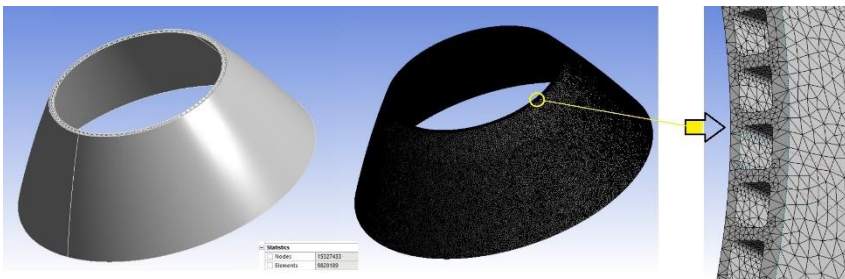
This part has the following characteristics: it is a conical shell with a thickness of 3 mm, diameters of 170.8 mm and 101.5 mm, and a height of 70.8 mm. The number of nozzle's cooling channels at the smaller diameter is  $N=100$ , with dimensions of  $1.68 \times 2.44$  mm. These channels are symmetrically arranged with a repeat angle of  $3.60^\circ$  around the circumference. At a height of 54.8 mm from the base, the channels double in number. At the base diameter of the cone, the number of channels is  $N=200$ , symmetrically arranged with a repeat angle of  $1.80^\circ$  around

the circumference. The dimensions of these channels are  $1.56 \times 1.98$  mm. It is evident that the symmetrically repeating part of the cross-section of the channel, in the first approximation, resembles an I-beam. Thus, geometric parameters of this I-beam, such as the area, center of gravity, and momentum of inertia, can be determined. The homogeneous model represents a shell of constant thickness, the value of which is determined by the condition that the momentum of inertia of the symmetrically repeating part equals the momentum of inertia of a rectangle. The base of this rectangle is equal to the base size of the I-beam. To satisfy the condition of mass invariance between the homogeneous model and the analyzed design, we calculate the thickness of the rectangle under the condition that the area of the rectangle equals the area of the I-beam.

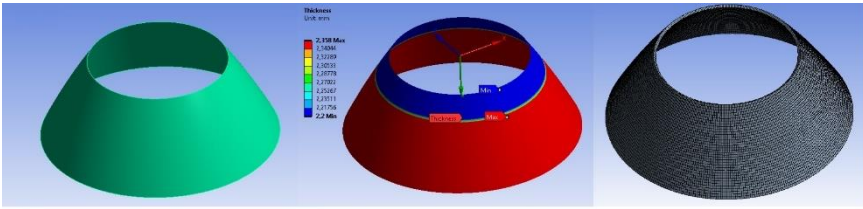
The thicknesses determined by the conditions of momentum of inertia equality,  $\delta i$ , and area equality,  $\delta F$ , differ. To create an equivalent homogeneous model, the material density of the homogeneous model is adjusted. The material density of the analyzed geometry is reduced by a factor, which is the ratio of the thicknesses  $\delta i / \delta F$ . The result of these operations is development of an equivalent homogeneous model with a constant thickness  $\delta i$  and an adjusted density that meets the condition of mass invariance. These parameters may vary according to the height of the shell.

## Results

To verify the correctness of the recommended approach, a numerical experiment was conducted, and the results of the calculations for the real model were compared with those for the homogeneous model developed according to the algorithm. Figures 2 and 3 present the main view, finite element model, and model elements for both the actual and homogeneous equivalent models. The homogeneous model features variable thickness and density. Up to a height of 16.0 mm from the base of the conical shell, its thickness is 2.358 mm. Then, it linearly decreases to 2.2 mm and remains constant. The density is adjusted by factors of 1.461 and 1.506 in the corresponding sections.

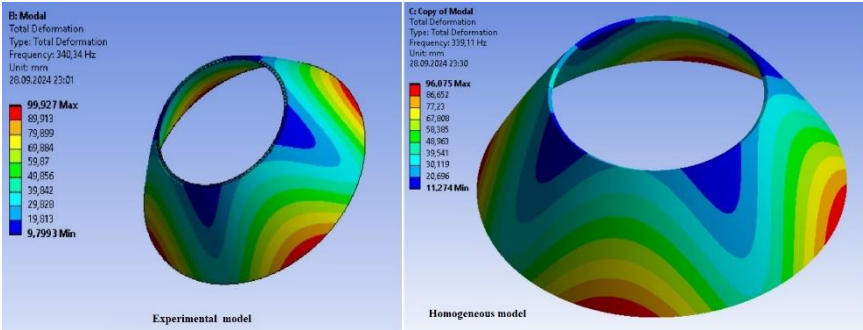


**Figure 2 – Main view and finite element model of the experimental shell  
(Source: author)**

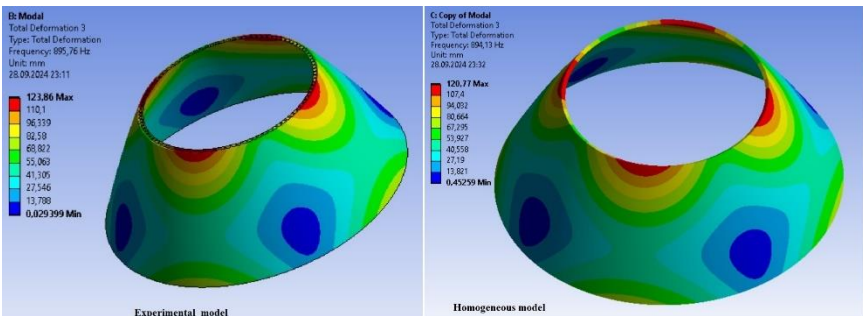


**Figure 3 – Main view and finite element model of the homogeneous model (Source: author)**

For comparison, the first 6 natural frequencies were calculated. The results of the natural frequency values for the models for the 1st, 3rd, and 5th harmonics are presented in Figures 4–6.



**Figure 4 – Comparison of the values of the 1st harmonic for the experimental and homogeneous models (Source: author)**

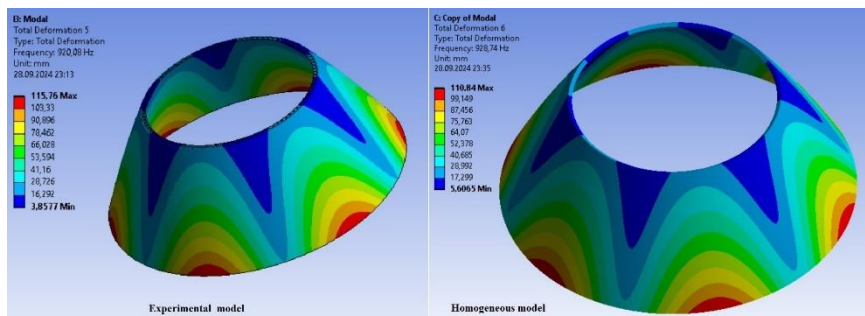


**Figure 5 – Comparison of the values of the 3rd harmonic for the experimental and homogeneous models (Source: author)**

The frequency differences between each harmonic of the experimental and homogeneous models are 1.23 Hz, 1.63 Hz, and 8.7 Hz, respectively. These values



correspond to deviations in the natural frequencies of the models by 0.36%, 0.18%, and 0.93%, respectively. The error in determining the natural frequency using the homogeneous model does not exceed 1% for all calculated natural frequencies. All calculations were performed in the ANSYS system.



**Figure 6 – Comparison of the values of the 5th harmonic for the experimental and homogeneous models (Source: author)**

A comparison of parameters of the finite element models for the experimental and homogeneous models, as well as the resources used, is presented in Table 1.

**Table 1 – Comparison of resources used and parameters of the finite element models in the experimental and homogeneous models (Source: author)**

Parameters	Experimental shell	Homogeneous shell
1. Number of nodes in the model	15327433	13320
2. Number of elements in the model	9829189	12960
3. Quality of the finite element mesh:		
Element Quality	0.7842	0.8748
Aspect Ratio	1.965	1.6734
Jacobian Ratio	0.9624	0.9855
4. Memory resources used the solution	92.3 Gb	1.580 Gb
5. Size of the results file	6.624 Gb	10.5 Mb
6. Calculation time for the task	3720 s	4 s

## Conclusions

The results of the comparative numerical modeling showed the following:

- when calculating the natural frequencies of axisymmetric shells with complex geometry, it is advisable to use a homogeneous model. The homogeneous model is a shell without channels, without elements of complex geometry, and has a constant thickness in the cross-section.

- the simplification of the geometry of the experimental shell is achieved by determining the parameters of the homogeneous model, which meet the requirements of equivalence of momentum of inertia and mass. The parameters of the

model are the shell thickness and density. The equivalence condition defines the variable thickness and density along the height of the homogeneous model.

- the obtained results showed that the deviation of the natural frequency of the experimental model from that of the homogeneous model does not exceed 1%.

- the simplification of the model allows for calculations without using powerful workstations. The number of nodes and elements in the model is reduced by more than 1000 times, enabling the creation of a significantly higher-quality mesh and reducing the computational error of the model. The use of computational resources and the time for problem solution are also significantly reduced.

## References

- Abaqus. (2009). *Abaqus user subroutines reference guide (v 6.6)*. Engineering School Class Web Sites. <https://tinyurl.com/yn2zcv3s>
- Amabili, M. (2008). *Nonlinear vibrations and stability of shells and plates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511619694>
- López Cela, J. J., Huerta, C., & Alarcón, E. (2000). Numerical analysis of axisymmetric shells by one-dimensional continuum elements suitable for high frequency excitations. *Computers & Structures*, 78(5), 711–724. [https://doi.org/10.1016/s0045-7949\(00\)00048-1](https://doi.org/10.1016/s0045-7949(00)00048-1)
- COMSOL. (2023). *COMSOL reference manual (v 6.2)*. COMSOL. <https://tinyurl.com/7arf7af3>
- Dey, T., & Ramachandra, L. S. (2015). Dynamic stability of simply supported composite cylindrical shells under partial axial loading. *Journal of Sound and Vibration*, 353, 272–291. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.05.021>
- Hexagon. (2022). *MSC Nastran 2022.1 quick reference guide*. Hexagon. <https://tinyurl.com/4ur5wnrr>
- Jansen, E. L. (2002). Non-stationary flexural vibration behaviour of a cylindrical shell. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 37(4–5), 937–949. [https://doi.org/10.1016/s0020-7462\(01\)00107-x](https://doi.org/10.1016/s0020-7462(01)00107-x)
- Mukherjee, A., Sarkar, S., & Banerjee, A. (2021). Nonlinear eigenvalue analysis for spectral element method. *Computers & Structures*, 242, 106367. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106367>
- Popov, A. A., Thompson, J. M. T., & McRobie, F. A. (1998). Low dimensional models of shell vibrations. parametrically excited vibrations of cylinder shells. *Journal of Sound and Vibration*, 209(1), 163–186. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1279>
- Rahman, T., Jansen, E. L., & Tiso, P. (2011). A finite element-based perturbation method for nonlinear free vibration analysis of composite cylindrical shells. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 11(04), 717–734. <https://doi.org/10.1142/s0219455411004312>
- Strozzi, M., & Pellicano, F. (2013). Nonlinear vibrations of functionally graded cylindrical shells. *Thin-Walled Structures*, 67, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.01.009>

# Аналіз можливостей створення безпілотного літального апарату для радіаційного моніторингу

Володимир Паламарчук , Олександр Пилипенко 

**Purpose.** This research focuses on analyzing the feasibility of developing an unmanned aerial vehicle (UAV) specifically designed for measuring radiation levels. Such a UAV would enhance safety and provide essential data in scenarios where human presence is either impossible or hazardous. **Design / Method / Approach.** The study utilized a combination of technical analysis of drone components and the modeling of the UAV's design. Various elements, including battery capacity, weight distribution, sensor integration, were evaluated to determine their suitability for assembling a radiation-monitoring drone. **Findings.** Through detailed analysis of existing drone components, the potential for creating a specialized UAV for radiation detection was assessed. Key findings indicate that current technologies can support the development of a drone capable of accurately measuring and transmitting radiation data in real time. **Theoretical Implications.** A theoretical model of the drone was developed, aimed at enhancing the collection and processing of radiation data. This could have significant implications for future scientific research in automated environmental monitoring, particularly in high-risk areas. **Practical Implications.** The development of such a UAV is essential for ensuring radiation safety, as well as for routine monitoring of radiation levels in testing grounds, industrial zones, and other environmentally sensitive locations. It would improve response times and reduce risks to human health. **Originality / Value.** This article offers an innovative approach by integrating automated data collection technologies into UAVs, significantly increasing the efficiency and scope of radiation monitoring, especially in areas that are difficult or dangerous for human access. **Research Limitations / Future Research.** The study's limitations involve the specific sensor models used, which may not be universally applicable to all potential UAV configurations. Further research will explore alternative technologies. **Paper Type.** Applied Research.

## Keywords:

radiation monitoring, unmanned aerial vehicle (UAV), drone design, real-time data transmission, environmental monitoring

## Contributor Details:

Volodymyr Palamarchuk., MSc of Civilian Security, Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, UA, pknd.29.75@gmail.com

Oleksandr Pylypenko, Cand.Sc., Assoc.Prof., Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, UA, alex.pilip@ukr.net

У сучасному світі дрони стали незамінними помічниками в багатьох галузях, завдяки своїм винятковим можливостям у зборі даних і моніторингу. У сільському господарстві ці технології використовуються для спостереження за станом врожаю та обприскування полей. У будівництві дрони активно сприяють проведенню топографічних зйомок, що дозволяє з точністю вимірювати земельні ділянки та планувати будівельні роботи. Вони також використовуються для створення 3D-моделей будівельних об'єктів, що допомагає проєктувальникам і архітекторам створити кінцевий результат. Крім того, дрони забезпечують контроль якості виконаних робіт, виявляючи відхилення від проєктних норм, що, в свою чергу, знижує витрати та підвищує ефективність проєктів (Maghazei et al., 2021). Схоже використання можливе в геодезії (Фоменко, 2024).

В екології їх застосовують для моніторингу якості повітря та води, слідкування за дикими тваринами і оцінки стану екосистем і змін в них, таких як забруднення води, вирубка лісів. Спираючись на досвід екологічного моніторингу та застосовуючи новітні технічні розробки необхідно використати досвід та проєктувати питання ведення радіаційного моніторингу на радіаційно-забруднених територіях за допомогою безпілотного летального апарату дрону-дозиметра.

Завдяки своїй універсальності та здатності підвищувати ефективність різних процесів, дрони мають величезний потенціал для подальшого розвитку та впровадження в нові сфери діяльності, що робить їх важливим інструментом у вирішенні багатьох сучасних викликів. Їхня роль у підвищенні продуктивності та зниженні витрат у багатьох галузях робить їх незамінними в умовах, коли ресурси стають дедалі обмеженішими.

Зараз радіаційний моніторинг є критично важливою складовою забезпечення безпеки населення та захисту навколишнього середовища. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) представляють собою перспективне рішення, що дозволяє здійснювати оперативний моніторинг радіаційної обстановки, забезпечуючи доступ до важкодоступних і небезпечних зон.

Використання БПЛА для радіаційного моніторингу відкриває нові можливості для збору даних, їх аналізу та обробки. Оснащення дронів сучасними приладами, що виявляють радіаційне випромінювання, дозволить отримувати точну інформацію про рівні радіації, а також виявляти джерела забруднення. Це, у свою чергу, дасть змогу приймати оперативні рішення щодо ліквідації наслідків радіаційних інцидентів та планування заходів для запобігання подібним ситуаціям у майбутньому.

## **Мета та завдання**

Мета даного дослідження полягає у створенні теоретичної моделі безпілотного літального апарату (БПЛА) для радіаційного моніторингу, який забезпечить точний та безпечний збір даних про радіаційний фон у різних умовах. У контексті зростаючих ризиків, пов'язаних із ядерними інцидентами, техногенними катастрофами та змінами в навколишньому середовищі, ефективний радіаційний моніторинг є критично важливим для захисту здоров'я

населення та збереження навколишнього середовища.

## Методологія

Головним методом даного дослідження була аналітика існуючих дронів та їх елементів (деталей), яка передбачала детальне вивчення доступних компонентів, використовуваних у сучасних безпілотних літальних апаратах. Цей метод дозволив провести порівняльний аналіз різних моделей дронів, їх конструкційних елементів і технічних характеристик, що має велике значення для подальшої розробки БПЛА для радіаційного моніторингу.

При дослідженні різноманітних дронів та їх елементів, такі як каркаси, мотори, акумулятори та системи навігації, наведених на рис. 1. При дослідженні основним аспектом стало оцінювання матеріалів за їх масою, матеріалом, міцністю та впливу на загальну продуктивність дронів та спроможність для переносу додаткової (корисної) ваги у вигляді дозиметричних приладів.

Після збору та систематизації інформації про існуючі деталі дронів була здійснена спроба зібрати модель безпілотного літального апарату, що відповідала поставленій задачі. Ця модель базувалася на характеристиках, які є критично важливими для ефективного виконання завдань радіаційного моніторингу, таких як точність, дистанційне керування, надійність та автономність.

Таким чином, поєднання аналітичного підходу з теоретичним моделюванням дозволило сформулювати чітке уявлення про необхідні елементи дрону та їхню сумісність, що стане основою для подальшої розробки та вдосконалення безпілотного літального апарату, здатного виконувати специфічні завдання в сфері радіаційного моніторингу.

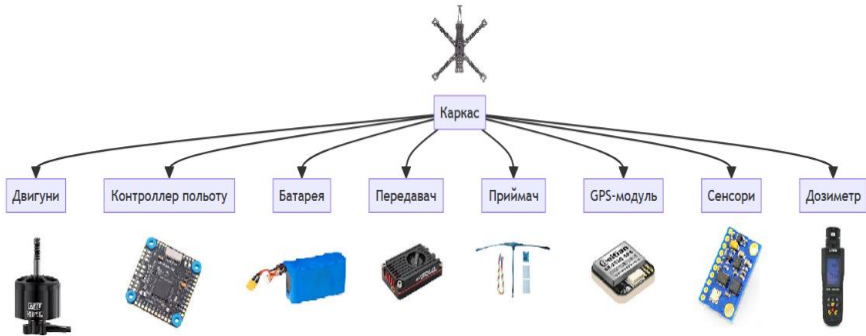
## Обговорення та результати

Роздивившись існуючі деталі дронів можливо зрозуміти, що потрібно підбирати кожен деталь окремо.

Каркаси дронів можуть суттєво відрізнятись за вагою в залежності від їхнього розміру та використовуваних матеріалів. Вони виготовляються з різних матеріалів, які забезпечують необхідну міцність, легкість і жорсткість. Пластик часто використовується для малих дронів через свою доступність і легкість, але він менш міцний у випадку ударів. Вуглецеве волокно є ідеальним для високопродуктивних моделей завдяки своїй відмінній міцності та легкості. Алюміній зазвичай застосовується для середніх і великих дронів, забезпечуючи високу міцність при відносно невеликій вазі, тоді як металеві сплави, такі як магній або титан, використовуються у великих дронах для підвищення жорсткості. Деякі дрони також можуть мати композитні каркаси, що поєднують властивості різних матеріалів, таких як вуглецеве волокно і епоксидна смола, для досягнення додаткової легкості та міцності.

Малі дрони зазвичай мають каркас, вага якого коливається від 30 до 200

грамів, виготовлених з легких матеріалів, таких як пластик або вуглецеве волокно. Середні за розмірами дрони мають каркаси вагою від 500 грамів до 2 кг, які можуть бути виготовлені з більш міцних матеріалів, таких як алюміній. Великі дрони мають каркаси вагою від 2 до 10 кг, що виготовляються з металевих сплавів або вуглецевого волокна для забезпечення високої міцності.



**Рисунок 1 – Загальна схема комплектування БПЛА з додаванням дозиметру  
(Джерело: Створено авторами)**

Акумулятори також мають різну вагу в залежності від їх типу і ємності. Найпоширенішими є літій-полімерні (LiPo) акумулятори, які відзначаються високою енергетичною щільністю, легкістю та можливістю заряджатися до великої ємності. Середня вага таких акумуляторів для малих дронів коливається від 50 до 300 грамів, тоді як для середніх вага може становити 400-800 грамів. Літій-іонні (Li-ion) акумулятори мають довший цикл життя, але часто є важчими — їхня вага може бути в межах 200-600 грамів для малих і 600-1200 грамів для середніх дронів. Деякі великі дрони можуть оснащуватися свинцево-кислотними акумуляторами, які є більш важкими (1-3 кг), але надійними та дешевими, хоч і мають нижчу енергетичну місткість.

Час роботи дронів визначається ємністю акумуляторів. Малі дрони зазвичай мають середній час роботи близько 5-20 хвилин, що зумовлено обмеженим розміром та виходячи з цього малими та легкими акумуляторами. Середні дрони можуть працювати 20-30 хвилин, в той час як великі дрони, залежно від конструкції та призначення, можуть мати час роботи від 30 до 60 хвилин або навіть більше в деяких випадках.

Вага вже зібраних дронів варіюється в залежності від їх розміру. Для малих дронів, які зазвичай важать до 500 грамів, середня вага становить близько 500 грамів. Середні дрони, вага яких коливається від 1 до 5 кг, мають середню вагу близько 2 кг. Великі дрони, зазвичай перевищують 5 кг та використовуються в професійних цілях, можуть важити приблизно від 6 до 15 кг.

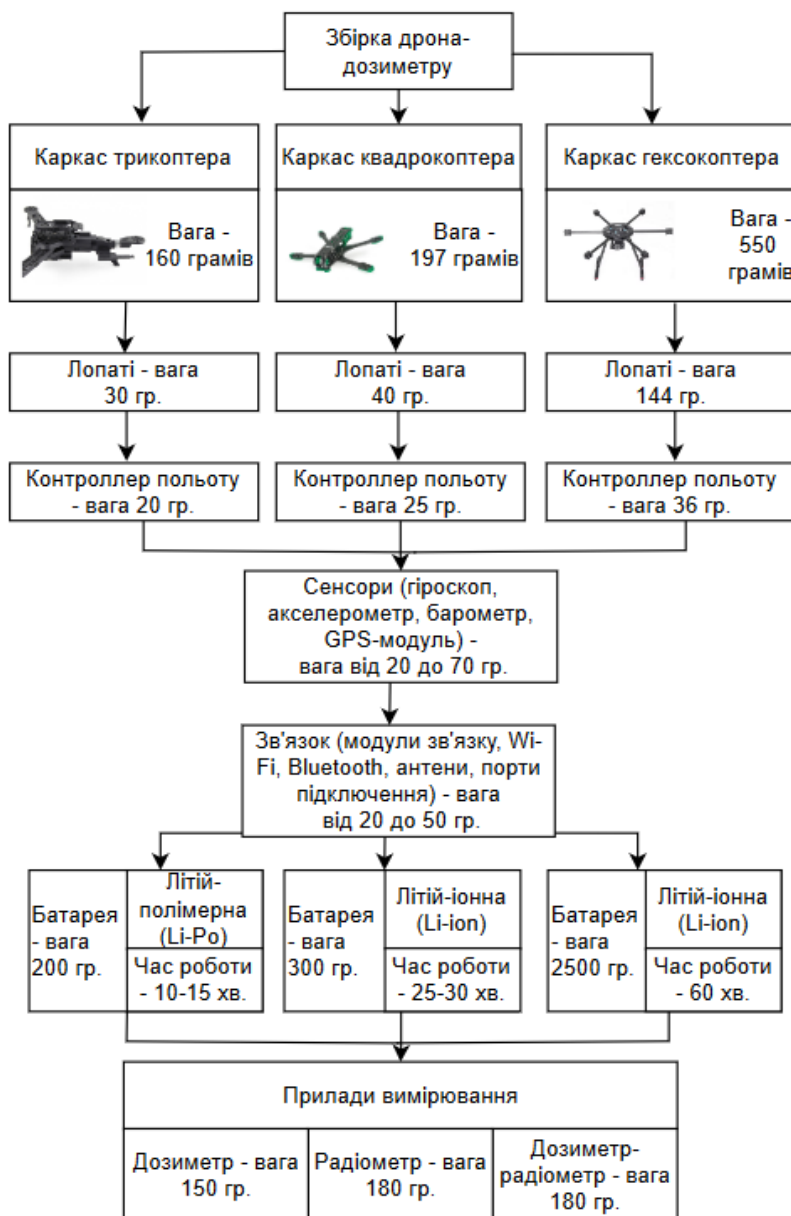


Рисунок 2 – Блок-схема збірки дрону-дозиметру для ведення радіаційного моніторингу (Джерело: Створено авторами)

Однак зважаючи на нашу мету необхідно підібрати ще й дозиметри з певною вагою. Середня вага портативних професійних дозиметрів варіюється в залежності від моделі та функцій, але зазвичай становить приблизно від 150 до 500 грамів. Легші моделі, призначені для швидкого моніторингу, можуть важити близько 150-250 грамів, тоді як більш складні та функціональні пристрої, які включають додаткові датчики або можливості обробки даних, можуть важити від 300 до 500 грамів. Вибір дозиметра залежить від конкретних вимог користувача, включаючи точність та чутливість.

Розглянувши результати зібраних даних було створено рисунок 2 блок-схему збірки дрону-дозиметру.

Визначаємо масу збірки для трикоптера. Каркас використовуються вагою 160 грамів, три лопаті будуть важити 30 грамів, контролер польоту та сенсори (барометр, акселерометр, гіроскоп та GPS-модуль) важить 40 грамів. Модуль зв'язку 20 грамів, батарея літій-полімерна 200 грам. Дозиметр 90 грам. Вага такого трикоптера буде складати 540 грамів. Можливість підйому такого апарату складає до 100 грам додаткової (корисної) ваги. Найлегші портативні дозиметри мають вагу 120-180 грамів, тобто трикоптери не можуть бути використані для перенесення додаткового обладнання.

Збірка маси для квадрокоптера. Каркас вагою 197 грам, чотири лопаті – 40 грам. Контролер польоту та сенсори (барометр, акселерометр, гіроскоп та GPS-модуль) важить 65 грамів. Модуль зв'язку з більшою дальністю дії 30 грамів, батарея літій-іонна з часом роботи близько 25 хвилин важить 300 грам. Дозиметр 150 грам. Маса дрону буде 782 грама. Такий дрон може переносити дозиметри з вагою до 1 кг, такі як портативний, індивідуальний або побутовий дозиметр.

**Таблиця 1 – Зведені дані маси елементів та самих апаратів  
(Джерело: Створено авторами)**

Назва елемента	Трикоптер	Квадрокоптер	Гексакоптер
Каркас, грам	160	197	550
Лопаті, грам	30	40	144
Контролер польоту, грам	20	25	36
Сенсори, грам	20	40	70
Модулі зв'язку, грам	20	30	50
Батарея, грам	200	300	2500
Дозиметр, грам	90	150	180
Сумарна маса, грам	540	782	3530



Визначаємо масу гексакоптера. Міцний та великий каркас вагою 550 грамів, на який прикріплюють шість лопатей які будуть важити 144 грама. Контролер польоту та усі необхідні сенсори – 106 грам. Модуль зв'язку та антена, яка дозволить керування дроном з відстані близько 5 кілометрів матимуть вагу 50 грамів. Літій-іонна батарея з часом роботи близько години важить 2500 грам. Дозиметр буде матиме вагу у 180 грамів. Вага такого апарату буде 3530 грамів. Такий апарат може нести додаткову вагу до 5 кг, що в свою чергу дозволяє переносити професійні дозиметри з додатковою камерою для фіксування вимірів. Сумарна маса елементів дронів та них самих наведена в таблиці 1.

З урахуванням сучасних досягнень у технології дронів і розвитку радіометрії, створення безпілотного літального апарату для радіаційного моніторингу, виглядає цілком можливим і перспективним напрямом. Однак такий дрон буде потребувати створення відповідного апаратного забезпечення (Савченко et al., 2024). Наразі вже існують дрони які можуть літати за визначеним маршрутом (Посвістак & Мірошниченко, 2024), однак потрібно буде зробити так, щоб дрон робив заміри автоматично, що буде потребувати його зависання на одному місці. Сучасні дрони забезпечують високу маневреність, здатність працювати в складних умовах і здійснювати тривалі польоти, що робить їх ідеальними для виконання завдань з моніторингу радіаційної обстановки на великих територіях. Інтеграція дозиметру-радіометру у конструкцію дрона дозволить оперативно отримувати дані про рівні радіації в різних точках, що значно підвищить ефективність моніторингу та зменшить ризики для людського життя. Дрон-дозиметр зможе виконувати функції виявлення радіаційних загроз, збору даних для подальшого аналізу та реагування на потенційні аварійні ситуації, що робить його важливим інструментом у сфері охорони навколишнього середовища та забезпечення радіаційної безпеки.

## Висновки

1. В попередніх дослідженнях було запропоновано проводити радіаційний моніторинг радіаційно-забруднених територій за рахунок дистанційно керованих наземних апаратів (Пилипенко et al., 2023a; Пилипенко et al, 2023b).

2. Виходячи з досліджень проведених в статті наведених в блок-схеми збірки дрону-дозиметру трикоптери та частина квадрокоптерів не підходить для перенесення додаткового обладнання вагою більш ніж 500 грам. Трикоптери зазвичай використовуються лише в розважальних цілях та несуть вагу не більше 100 грам, а більша частина квадрокоптерів лише для відео-зйомки та здатні переносити в середньому не більше 500 грам, однак деякі моделі які наближаються розмірами до великих дронів мають змогу нести вагу до 1 кілограма. Найбільш доцільним є використання гексакоптерів, які можуть нести на собі великий корисний вантаж до 5 кілограм та мають досить великий час роботи. На такий апарат можливо буде встановити професійний дозиметр та додаткову камеру для фіксування вимірів.

3. Для подальших досліджень автори планують зробити збірку дрон-дозиметру з окремих елементів, уточнити перелік цих елементів, визначити фактичну вагу збірки та виготовити дослідний екземпляр дрону-дозиметру з подальшим його натурним випробуванням в польових умовах.

## Посилання

- Maghazei, O., Netland, T. H., Frauenberger, D., & Thalmann, T. (2021). Automatic Drones for Factory Inspection: The Role of Virtual Simulation. *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*, 457–464. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7_48)
- Пилипенко, О. В., Беліков, А. С., Рагімов, С. Ю., Андреева, А. В., & Саньков, П. М. (2023). Моніторинг територій промислових майданчиків радіаційно-небезпечних об'єктів за допомогою малих дистанційно керованих наземних апаратів. In *Problems of the Development of Science and the View of Society*, 11, 402–412. <https://doi.org/10.46299/isg.p.2023.1.11>
- Пилипенко, О. В., Саньков, П. М., Рагімов, С. Ю., Рибалка, К. А., & Карасьов, Г. Г. (2023). Аналіз характеристик великих дистанційно керованих наземних апаратів для проведення моніторингових досліджень на хвостосховищах колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ». In *Information activity as a component of science development*, 13, 545–557. <https://doi.org/10.46299/isg.p.2023.1.13>
- Посвістак, В., & Мірошниченко, Д. (2024). Architecture of autonomous control system for FPV-drones. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337(3(2)), 223–230. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-33>
- Савченко, Я., Ягодзінський, С., Литвиненко, Л., & Сушинський, О. (2024). Hardware and software and application of unmanned aircraft. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337(3(2)), 273–277. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-41>
- Фоменко, В. (2024). Технології дронів у геодезії: перспективи та виклики. *Наука і Техніка Сьогодні*, 9(37), 918-930. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-9\(37\)-918-930](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-9(37)-918-930)

# Evolution of Multiple Launch Rocket Systems from Early Rockets to HIMARS and Beyond

Mykola Bondarenko , Volodymyr Habrinets ,  
Mykhailo Vorobei 

**Purpose.** The article examines the evolution of multiple launch rocket systems, from early rocket munitions to HIMARS, and explores their future development. It focuses on HIMARS' technical advantages and its impact on combat tactics. **Design / Method / Approach.** The study relies on open-source data, including official reports and news on HIMARS use. Methods include analyzing precision strike effectiveness, tactical outcomes, and strategic impact through comparative analysis of different missile types in combat. **Findings.** Key aspects include the development of accuracy and range, the shift to precision weapons, and the impact on battlefield dynamics. HIMARS has enhanced mobility and adaptability. **Theoretical Implications.** This study contributes to the theoretical understanding of MLRS in modern warfare, with a specific focus on HIMARS' evolving role in shaping new military tactics and its integration into contemporary combat doctrine. It enhances the knowledge base on precision artillery systems and their operational effectiveness. **Practical Implications.** The article offers recommendations for military analysts on using HIMARS and selecting appropriate missiles for combat scenarios. **Originality / Value.** This work provides an original analysis of the evolution of MLRS, offering a unique perspective on the technological and tactical advancements embodied in HIMARS. It serves as a valuable resource for military experts, defense analysts, and researchers interested in understanding the development of modern artillery systems and their role in future warfare. **Research Limitations / Future Research.** The study is based on open-source data, which may limit the scope of analysis and exclude classified information that could provide a more comprehensive view. Future research could include in-depth evaluations of missile effectiveness, long-term operational data, and HIMARS' ongoing impact on global military strategies. **Paper Type.** Discussion Paper.

## Keywords:

HIMARS, MLRS, modern military conflicts, missile technology, multiple launch rocket system

## Contributor Details:

Mykola Bondarenko, PhD candidate, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [m.bondarenko@ff.dnu.edu.ua](mailto:m.bondarenko@ff.dnu.edu.ua)

Volodymyr Habrinets, Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [habrinets@ff.dnu.edu.ua](mailto:habrinets@ff.dnu.edu.ua)

Mykhailo Vorobei, PhD candidate, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [m.vorobei@ff.dnu.edu.ua](mailto:m.vorobei@ff.dnu.edu.ua)



Rocket engines continue to develop rapidly, with one of the main objectives being the creation of efficient and safe systems for delivering the payload to precisely defined coordinates. Three main types of engines are used for modern military missions: solid-fuel, liquid-fuel, and hybrid rocket engines, which combine a liquid oxidizer with solid fuel. Each of these systems has distinct advantages and disadvantages, and the selection of one or another solution depends on the specific tasks at hand, balancing these factors (Glaser et al., 2023).

One of the leading areas of development in rocket technology for military purposes has been multiple launch rocket systems (MLRS) and precision-guided missile weapons. Multiple launch rocket systems are a type of artillery weapon that uses munitions with rocket propulsion. MLRS are designed to deliver mass strikes against area targets. The history of MLRS began in the 20th century with the development of technologies, and to this day, this weapon has undergone significant evolution. The idea of using rocket shells for salvo fire originated in the interwar period of the 1930s. The pioneers in the creation of the first rocket systems were the Soviet Union and Germany. Initial developments focused on creating rocket fuel and studying the possibilities of launching rockets over long distances (Krepinevich, 2023).

One of the key achievements of Soviet engineering was the creation of the RS-82 and RS-132 rocket shells, designed for installation on aircraft and tested in 1937. These were small rockets that used solid fuel and could strike both ground and air targets. In Germany, the possibility of using rocket shells to create weapons capable of attacking the enemy over large areas was also explored. This research led to the creation of the Nebelwerfer mortars, which became an important step in the development of rocket artillery. The tests showed that such shells had the potential for use in salvo fire, as they could cover a significant area through multiple launches. This led to the idea of developing more powerful multiple launch rocket systems for use in field conditions (Bailey, 2003).

The Soviet command saw this as a way to suppress large concentrations of enemy manpower and equipment. The goal was set to create a mobile system capable of striking targets at significant distances and characterized by high deployment speed. It was during this period that the concept of the MLRS was born—a multiple-launch weapon capable of covering large areas through the simultaneous launch of dozens of rockets. By the early 1940s, the famous Soviet BM-13 system, later named "Katyusha," was developed (Prenatt, 2018). The first combat operation of the BM-13 ("Katyusha") systems took place on July 14, 1941, near the city of Orsha in Belarus, just a few weeks after the start of the German-Soviet War. During the attack, a Soviet battery under the command of Captain Ivan Flerov struck a German crossing over the Orshitsa River. The powerful salvo came as a surprise to the Germans: in less than a minute, the rockets caused significant damage to the enemy, destroying artillery positions, ammunition, and equipment at the crossing. This strike demonstrated the potential of the "Katyushas" as a means to deliver powerful firepower against troop concentrations and fortifications (Strong & Marble, 2011).

After the successful use of Katyushas during World War II, multiple launch rocket systems (MLRS) continued to evolve and gain widespread adoption around

the world. This development included improvements in mobility, accuracy, range, as well as integration with modern information and navigation systems (Campbell, 2020).

## **Purpose**

The purpose of this article is to analyze the evolution of multiple launch rocket systems, specifically the HIMARS system, as well as to study the technical advantages of multiple launch rocket systems and their impact on combat tactics. The article explores how advancements in accuracy and mobility affect the dynamics of combat, as well as considering the prospects for further development of multiple launch rocket system technologies. The implementation of GPS significantly enhances the effectiveness of multiple launch rocket systems by improving accuracy, mobility, and the ability to carry out highly accurate strikes. This, in turn, alters tactical approaches in modern warfare, allowing for the destruction of strategic targets with minimal losses.

## **Data and Methods**

The research is based on open sources of information, including official military reports, news about the use of HIMARS in combat conditions, and publications on multiple launch rocket systems. Additionally, articles from scientific journals, technical documents, and studies related to the development and use of HIMARS are also utilized. In particular, the following methods were used:

1. **Comparative Analysis.** This method was used to compare HIMARS with other multiple launch rocket systems, evaluating differences in terms of accuracy, range, mobility, and adaptability.

2. **Tactical Evaluation.** A detailed analysis of how the introduction of HIMARS has impacted combat strategies, focusing on real-world examples and case studies from military operations.

3. **Effectiveness Assessment.** The effectiveness of precision strikes was assessed by examining the precision, speed, and impact of multiple launch rocket systems in various combat scenarios, using available data and reports on its use in military engagements.

4. **Literature Review.** A review of open-source publications, technical documents, and scientific research on the development, deployment, and operational use of HIMARS and similar systems in combat.

5. **Data Synthesis.** Data gathered from military reports, news articles, and technical studies were synthesized to draw conclusions about the strategic and operational implications of multiple launch rocket systems in modern warfare.

## **Description of the MLRS system design**

After World War II, multiple launch rocket systems continued to develop in the Soviet Union and other countries. The focus was primarily on improving the

mobility and power of the systems. The Soviet Union continued to refine the BM-13 system ("Katyusha"), developing new versions with improved accuracy and range. During this period, MLRS such as the BM-21 "Grad" (developed in 1960) emerged, becoming the cornerstone of Soviet artillery for many years and being used in numerous local conflicts. In the United States, the Multiple Launch Rocket System (MLRS) was developed, which would later become the foundation of American rocket artillery.

The BM-21 "Grad" is a Soviet-era multiple rocket launcher system (MRLS) designed for artillery support and capable of delivering heavy firepower over a large area. It was introduced in 1963 and became one of the most widely used rocket artillery systems in the world. Its design is based on simplicity, ruggedness, and effective firepower, making it highly suitable for both offensive and defensive operations (Nistorescu, 2024).

The BM-21 is mounted on a Ural-375D or Ural-4320 6x6 truck chassis, providing the system with a mobile platform for rapid deployment and relocation. The truck has a special platform to mount the launcher frame, which is capable of holding 40 rocket tubes. The launcher system is designed to fire rockets in a rapid salvo, creating a saturation effect over a large area.

The BM-21 fires the 122mm Grad rockets, which are available in a variety of configurations, including high-explosive fragmentation (HE-FRAG), incendiary, and smoke rockets, as well as chemical and cluster munitions. The rockets are designed to be inexpensive to produce and easy to maintain, making the system an attractive option for both state military forces and irregular armed groups. The range of the rockets is typically between 20 and 40 kilometers, depending on the type of warhead and the trajectory (Campbell, 2020).

The system uses a simple yet effective fire control system, with fire adjustments made manually or using basic targeting information from reconnaissance units or forward observers. The BM-21 does not have advanced guidance or targeting systems but relies on its firepower and the volume of rockets launched to saturate target areas. It can fire all 40 rockets within a few seconds, creating an intense impact on enemy forces or infrastructure (Dantis, 2023).

The BM-21 is highly mobile and can be rapidly deployed or relocated. The system can be set up and fired in minutes and is effective in both open and mountainous terrain. However, it requires a relatively large crew and logistical support for operations, including the transportation of ammunition and fuel.

The early development of MLRS systems was largely initiated during the Cold War by the United States, with the M270 MLRS being one of the first modern systems to represent the capabilities of rocket artillery in the 1980s. However, the earliest MLRS designs were heavily influenced by the lessons learned from earlier rocket artillery systems like the BM-21 and Soviet-era Katyusha systems (Gady & Kofman, 2023).

The M270 MLRS is a tracked system mounted on the M2/M3 Bradley Infantry Fighting Vehicle chassis, providing high mobility, armor protection, and cross-country capabilities. The system features a 12-tube launcher capable of firing 227mm rockets, providing a much larger payload than the BM-21.

The M270 is capable of launching both guided and unguided rockets,

including GMLRS (Guided Multiple Launch Rocket System) rockets, which have a range of up to 70 kilometers and can deliver highly accurate strikes. The system is also capable of firing ATACMS missiles, which have a much longer range, up to 300 kilometers, depending on the variant. The use of precision-guided rockets greatly improves accuracy and reduces collateral damage compared to earlier systems like the BM-21 (Strong & Marble, 2011).

The M270 MLRS is equipped with an advanced fire control system, including GPS guidance for precise targeting. It can quickly fire rockets at pre-determined targets with minimal crew involvement. The system can fire rockets in rapid succession, with a full salvo of 12 rockets being launched within 30 seconds. The crew typically consists of three personnel: the driver, gunner, and crew chief (Harrison & Evans 2019).

The M270 is designed for fast mobility and can be deployed in various terrains, including forests, mountains, and urban environments. It has a robust armored hull, providing protection from small arms fire and shrapnel. It is also capable of quickly relocating after firing to avoid counterattacks. The comparison of these two systems is presented in Table 1 (Pomper & Tuganov, 2023).

**Table 1 – Comparison of BM-21 and Early MLRS (Source: Qian & Chen, 2022)**

Feature	BM-21 "Grad"	Early MLRS (M270)
Launch Platform	6x6 truck chassis	Tracked M2/M3 Bradley chassis
Rocket Type	122mm Grad rockets	227mm rockets, GMLRS, ATACMS
Firing Capacity	40 rockets	12 rockets
Range	20–40 km	70 km (GMLRS), 300 km (ATACMS)
Accuracy	Low (unguided)	High (guided and unguided)
Fire Control System	Manual/Basic	Advanced (GPS, computerized)
Mobility	High, off-road capable	High, but tracked
Protection	No armor	Armored for crew protection
Deployment Time	3-5 minutes	3-5 minutes

If we analyze the presented characteristics, we can observe the next step in the development of multiple launch rocket systems, which will guide their improvement in the coming years — the implementation of positioning and orientation systems to enhance the accuracy of the rocket launcher.

## MLRS Operation Process with GPS

The integration of the MLRS with GPS significantly enhances the accuracy, efficiency, and effectiveness of the system. The GPS system enables precise targeting, real-time navigation adjustments, and optimized mission execution. Below is a detailed breakdown of how the MLRS operates in conjunction with GPS:

1. **System Initialization and Pre-launch:** The MLRS system is positioned, and GPS is initialized to track the system's position. Target coordinates are entered, and the GPS provides real-time updates to optimize the firing solution.

2. **Firing Process:** The fire control system calculates the launch parameters using GPS data. Guided rockets (such as GMLRS) receive midcourse guidance

via GPS to adjust their trajectory for precise targeting.

3. Post-launch Operations: Real-time feedback from the GPS system helps to evaluate the effectiveness of the strike. The system may reposition itself, with GPS aiding in accurate navigation.

4. Coordination and Communication: GPS data is integrated with command-and-control systems for effective coordination with other units. MLRS systems deliver coordinated strikes, with GPS ensuring synchronization and precision.

5. Post-mission Data and Analysis: GPS data is logged and used for after-action analysis to improve future missions.

By the time GPS was first used in multiple launch rocket systems and high-precision missile weaponry in the 1990s, satellite positioning systems began to actively develop in several countries, including the USA and the USSR, and later in other countries. Here are the key points regarding the use of satellite systems in these countries.

The United States began deploying the global positioning system (GPS) in 1978. It became fully operational by 1995 when the number of satellites in the orbital constellation reached the necessary level for global coverage. Multiple launch rocket systems (MLRS) started using GPS to improve accuracy in the 1990s. Specifically, the GMLRS (Guided Multiple Launch Rocket System), part of the MLRS, uses GPS for precise targeting.

The Soviet Union (USSR) started developing the GLONASS satellite navigation system in 1976. The first satellites were launched into orbit in 1982, and by the early 1990s, GLONASS became operational within the USSR. Russia used GLONASS in precision-guided missile systems and multiple launch rocket systems, such as the Tochka-U tactical missile system and the Smerch, although GPS was also used in some cases to enhance accuracy.

China began developing its BeiDou satellite navigation system in the 2000s. Initially, the system used satellites with regional coverage, but by the 2010s, it began evolving into a global network. China integrated BeiDou into its precision-guided systems and high-precision artillery. Multiple launch rocket systems, such as the A-100, and medium-range missiles began using this navigation system to improve targeting accuracy.

The European Union started developing its Galileo satellite navigation system in the 2000s, with plans to achieve full coverage by 2020. Despite the later launch, EU countries began integrating Galileo into their precision-guided weaponry and artillery in the 2010s. Countries such as Germany, the United Kingdom, and France used GPS and later Galileo in their systems, such as the Mars II.

India developed its regional satellite navigation system IRNSS (NavIC) in the 2000s. The system became operational in 2016, and its use in military applications has significantly increased since then. India began integrating NavIC into its systems, including artillery and missiles, to improve targeting accuracy in systems such as the Pinaka (Plessis, 2023). Thus, satellite positioning systems have become a key element in enhancing the accuracy and effectiveness of multiple launch rocket systems and precision-guided missile weapons in many countries.



## Limitations and challenges

While Multiple Launch Rocket Systems offer significant advantages in terms of firepower, range, and the ability to deliver a large volume of rockets on target quickly, they also face several limitations and challenges. These challenges can affect the operational effectiveness, strategic use, and overall success of MLRS in various military operations. One of the key limitations of early MLRS was the lack of precision targeting. In conventional MLRS systems, rockets were typically unguided, relying on the accuracy of the launcher's position and fire control system. While the development of guided rockets (such as GMLRS) has significantly improved accuracy, even modern systems can still experience challenges with targeting precision under certain conditions, especially in complex terrains or adverse weather conditions. Even guided rockets can face issues related to GPS jamming or interference, which can degrade their targeting ability. When operating in environments where GPS signals are obstructed or spoofed, MLRS can lose its accuracy, leading to the potential for collateral damage or mission failure.

MLRS, like all artillery and rocket systems, are susceptible to countermeasures that can diminish their effectiveness. These countermeasures include radar jamming, electronic warfare, and the deployment of anti-artillery systems such as counter-battery radars and interceptors designed to neutralize incoming rockets. The cost of purchasing, operating, and maintaining MLRS platforms can be prohibitively high for some countries. Modern systems like the M270 or M142 HIMARS, along with their guided rocket munitions, require significant investment in both hardware and operational costs. Additionally, the maintenance of these systems, especially the advanced electronics, fire control systems, and complex rocket launchers, requires a high level of technical expertise (Plessis, 2023).

The operational effectiveness of MLRS can be heavily influenced by environmental conditions, such as extreme weather (e.g., rain, snow, or extreme heat), and the nature of the terrain. Harsh weather can affect the guidance systems of rockets, the accuracy of fire control systems, and the comfort and functionality of the crew operating the system (Hill, 2021). Despite the impressive range of modern MLRS, there are still constraints related to the maximum effective range of the rockets. The maximum firing range for systems like the GMLRS is typically around 70-90 kilometers, but this range may be insufficient for some tactical situations, particularly when engaging distant targets. The performance of rockets can also vary depending on the type of warhead or payload used, and their effectiveness can be diminished in specific target environments, such as heavily fortified positions or protected targets. The need to deploy a large number of rockets to ensure target destruction can increase the logistical burden and limit the effectiveness of MLRS in prolonged engagements (Russo, 2018).

## The concept of separating the solid-fuel casing

One of the main problems limiting the range and accuracy of missile flight in

multiple launch rocket systems is the weight of the missile, caused by the use of a heavy solid-fuel casing and large dimensions. When the missile begins its flight, the solid fuel in the engine burns off, but the mass and size of the missile, including the casing, remain significant, creating additional air resistance and reducing the flight range. Moreover, after the solid fuel is exhausted, the control of the rocket completely depends on the gas-dynamic rudder system. However, due to the large size of the rocket's body, the effectiveness of this control system is limited, as well as the possibility of precise targeting.

To solve this problem, a concept has been proposed that involves separating the solid-fuel casing of the missile after the main fuel burns out, leaving only the warhead and guidance system for further flight.

After the fuel burns out, a specially designed mechanism separates the missile's casing, which can be ejected using pyrotechnic charges or mechanical grips. This allows for the removal of mass that no longer serves any functional purpose, reducing the missile's size and significantly decreasing air resistance.

The separation of the heavy casing after the fuel burns out immediately reduces the overall mass of the missile. The reduced length lowers aerodynamic drag, allowing the missile to achieve greater flight range. This technique also reduces the need for additional control and stabilization systems, as the remaining part of the missile has smaller dimensions and weight.

After the separation of the solid-fuel casing, the missile continues its flight with high manoeuvrability, as its gas-dynamic control system operates more efficiently with reduced resistance. This improves guidance accuracy and enables the missile to reach its target more precisely at long distances.

## **Analysis of current systems using the example of HIMARS evolution**

The development of HIMARS began in the mid-1980s when Loral Vought Systems started exploring the possibility of creating a highly mobile rocket artillery system capable of air transport. In 1990, the U.S. Army articulated the requirements for a lightweight version of the Multiple Launch Rocket System, leading to the creation of the HIMARS prototype, which was first demonstrated in 1994. In early 1996, Lockheed Martin received a contract to assemble prototypes of HIMARS, which underwent testing in 1998. The system was certified for use by the military in 2005, and the first unit to receive HIMARS became part of the XVIII Airborne Corps of the United States.

HIMARS was first used in combat in 2010 during operations in Afghanistan. Since then, the system has been actively employed in various conflicts, including the wars in Iraq and Syria.

Since the early 2020s, HIMARS have been delivered to Ukraine as part of military assistance from the United States. This event has attracted the attention of the international community and marked a significant milestone in equipping the Ukrainian armed forces with modern weaponry. It is suggested to consider several generations of this type of missile (Krepinevich, 2023).

## **M-26 Rocket**

The M-26 Basic Rocket is a widely used ammunition type for Multiple Launch Rocket Systems (MLRS) today. This free-flight, single-stage solid propellant rocket is capable of delivering conventional munitions to ranges between ten kilometers and thirty-two and a half kilometers. The M-26 functions as a high-volume area fire weapon system, making it effective against personnel and lightly armored targets. Due to its large impact area, it should not be fired within two kilometers of friendly troops, except in extreme situations.

The M-26 rocket carries 644 Dual Purpose Improved Conventional Munitions (DPICM) submunitions, which are known to have a tendency to malfunction. Tactical maneuver plans must account for movement restrictions that may arise when using M-26 rockets in areas where subsequent friendly maneuvers could be necessary based on the tactical situation. Currently, M-26 rockets are not a suitable option for engaging hard, moving, or point targets due to their accuracy and munition effectiveness (Prenatt, 2018).

## **ER-MLRS**

The Extended Range Multiple Launch Rocket System is an advancement of the existing M26 Dual Purpose Improved Conventional Munition rocket. ER-MLRS is a free-flying, single-stage solid propellant rocket designed to deliver a variety of conventional munitions over greater distances compared to the M26 rocket. This system offers commanders increased flexibility by enabling expanded cross-border fire capabilities and allowing continuous fire during rapid offensive operations. Survivability is significantly enhanced during defensive actions, as commanders can now target the enemy's long-range artillery and rocket systems. The ER-MLRS can be launched from both the MLRS M270 and the High Mobility Artillery Rocket System. In addition to extending the range of MLRS and HIMARS, the ER-MLRS also has a substantial positive impact on the accuracy and reliability of its submunitions. Notably, it replaces the M-77 submunition used in the M-26 with the XM-85 DPICM submunition, which features a self-destruct fuse mechanism. This enhancement reduces the dud rate to 1% or lower, compared to the M-77's dud rate, which can be as high as 5% (Prenatt, 2018).

## **GMLRS**

The Guided Rocket of the Multiple Launch Rocket System is a modification of the Extended Range Rocket. GMLRS is an inertially guided, single-stage solid propellant rocket designed to deliver a variety of conventional munitions over significantly greater distances with much higher accuracy than the M-26 or ER-MLRS free-flight rockets. Equipped with a DPICM warhead, the GMLRS will provide division and corps commanders with an organic capability to engage enemy air defence systems, fire support systems, as well as soft targets and personnel at extended ranges using considerably fewer rockets. The minimum range of the rocket is between ten to fifteen kilometres, while the maximum range extends

from sixty to seventy kilometres (Qian et al., 2022).

## **MSTAR**

The Multiple Launch Rocket System (MLRS) Smart Tactical Rocket (MSTAR) is an inertially guided, single-stage, solid propellant rocket designed to deliver smart, multifunctional submunitions over significantly greater distances with enhanced accuracy compared to the basic M26 or the Extended Range MLRS free-flight rockets. MSTAR represents a modification of the MLRS Guided Rocket program, integrating smart, multifunctional submunitions into its warhead while utilizing the same guidance, control section, and rocket motor.

MSTAR carries one to four versatile smart submunitions, reaching ranges of over fifty kilometers. These submunitions have the capability to detect, engage, and neutralize both manpower and equipment, whether stationary or moving (Plessis, 2023).

## **ATACMS Block I and IA**

The Army Tactical Missile System (ATACMS) Block I is a conventional, long-range, surface-to-surface guided missile featuring a semi-ballistic flight path and equipped with an anti-personnel, anti-materiel (APAM) warhead. These missiles are strategically distributed worldwide as part of the ammunition supply for corps Multiple Launch Rocket System (MLRS) battalions and can be launched from any MLRS M270 or HIMARS launcher. The Block I variant can deploy 950 M-74 APAM grenades over a maximum range of 165 kilometers. The ATACMS Block I was first introduced in September 1990 and successfully utilized in combat during the Gulf War, with 1,545 missiles currently in active deployment. The Army Tactical Missile System Block IA is an enhanced version of the Block I missile. This variant incorporates a global positioning system receiver that continuously updates the missile's location during its flight, which greatly improves accuracy for effective strikes at longer distances.

The Block IA can deliver around 300 M-74 APAM grenades with a maximum range exceeding 300 kilometers (Campbell, 2020).

## **ATACMS Block II and IIA**

The Army Tactical Missile System (ATACMS) Block II is a conventional, long-range, surface-to-surface, guided, semi-ballistic missile that incorporates the ATACMS Block IA missile along with Brilliant Anti-Tank (BAT) submunitions. The propulsion, guidance, and control sections of Block II remain identical to those of Block IA. The warhead for Block IA is modified to carry and deploy thirteen BAT submunitions over a distance of 140 kilometres (Bailey, 2003).

## **Comparison with Traditional Systems**

The comparison of the effectiveness of multiple launch rocket systems with

engine separation after fuel burn-out versus single-stage rockets, using the evolution of HIMARS as an example, can be conducted across several key parameters, such as aerodynamic drag, flight range, maneuverability, and missile weight. Let's examine each of these factors to highlight the differences and advantages.

1. **Aerodynamic Drag:** Once the solid-fuel casing is detached after solid fuel burn-out, the length changes, which leads to a decrease in the frictional resistance component of the body. This leads to improved flight performance, allowing the missile to achieve greater speed and range. HIMARS, as a single-stage system, maintains its full length throughout the flight, which results in higher aerodynamic drag and reduced efficiency compared to a system that sheds unnecessary parts.

2. **Flight Range:** By shedding the heavy casing after the fuel is consumed, the missile becomes lighter and more streamlined, enabling it to cover longer distances than its initial design would suggest.

3. **Maneuverability:** After the engine burns out and the casing is discarded, the missile's smaller, lighter structure enhances its maneuverability. The reduced drag allows the missile's control system to operate more efficiently, improving its ability to adjust flight paths and hit precise targets over long distances.

4. **Missile Weight:** The separation of the engine casing reduces the missile's overall weight, which enhances its efficiency.

5. **Detection decreases:** A smaller missile size makes it less visible to radar and other detection systems, lowering the chances of early interception. By reducing both size and weight through component separation, the missile achieves a stealthier profile, further enhancing its survivability and effectiveness in reaching its target undetected.

## Key findings

Separating the solid-fuel engine casing after burn-out significantly reduces the missile's weight and aerodynamic drag, allowing it to achieve greater flight range and efficiency compared to single-stage systems. With reduced mass and size, the missile becomes more maneuverable, allowing its guidance systems to operate more effectively. This results in increased precision and adaptability over long distances. A smaller missile profile reduces its radar signature, making it less likely to be detected and intercepted. This advantage enhances the missile's chances of reaching its target successfully. The lighter post-separation structure reduces the load on control and stabilization systems, simplifying the missile's design and lowering the need for complex stabilization mechanisms.

## Conclusion

Modern and highly effective weapon systems combine long-range capability, mobility, and precision. Their role in future conflicts will only grow as technologies advance and fire support systems improve, making them an indispensable part of modern armies' arsenals. Ongoing research and development are crucial for the continuous enhancement of missile systems. As military threats evolve and

combat environments become more complex, extending range, improving accuracy, and increasing adaptability of missile systems become essential. Implementing innovations, such as separating the spent engine section, will provide armed forces with a decisive advantage on the battlefield, ensuring the relevance of missile systems in future conflicts.

## References

- Nistorescu, C. V. (2024). The asymmetries generated by new weapon systems and their role in achieving success on the battlefield. *The Impact of HIMARS on the conflict in Ukraine*, 117-128. <https://doi.org/10.53477/2284-9378-24-34>
- Dantis, I. (2023). Challenges in the management of defense resources life cycle cost analysis for a military capability (High Mobility Artillery Rocket System-HIMARS). *Defence Resources Management in the 21st Century*, 18(18), 59-71. <https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=1212055>
- Gady, F. S., & Kofman, M. (2023). Ukraine's strategy of attrition. *Survival*, 65(2), 7-22. <https://doi.org/10.1080/00396338.2023.2193092>
- Pomper, M., & Tuganov, V. (2023). Role of Missiles in Russia's War on Ukraine and Its Implications for the Future of Warfare. In *Russia's War on Ukraine: The Implications for the Global Nuclear Order* (pp. 69-93). Cham: Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32221-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32221-1_6)
- Russo, J. (2018). *Long-Range Precision Fires*. US: Marine Corps Gazette. <https://tinyurl.com/4ejr59vn>
- Krepinevich, A. F. (2023). *The origins of victory: How disruptive military innovation determines the fates of great powers*. Yale University Press. <https://tinyurl.com/mruaahu7>
- Bailey, J. P. A. (2003). *Artillery and warfare 1945-2025*. <http://hdl.handle.net/1826/4008>
- Strong, P., & Marble, S. (2011). *Artillery in the Great War*. Grub Street Publishers. <https://tinyurl.com/48jwkrzd>
- Campbell, D. (2020). *Soviet Airborne Forces 1930–91* (Vol. 231). Bloomsbury Publishing. <https://www.ospreypublishing.com/ca/soviet-airborne-forces-193091-9781472839565/>
- Qian, L., Chen, G., Tong, M., & Tang, J. (2022). General design principle of artillery for firing accuracy. *Defence Technology*, 18(12), 2125-2140. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.09.001>
- Harrison, R., & Evans, D. (2019). Artillery in the Great Patriotic War: Innovation and Evolution in Soviet Firepower. *Journal of Slavic Military Studies*, 32(1), 58–77. <https://tinyurl.com/48jwkrzd>
- Jamie Prenatt (2018). *Katyusha: Russian Multiple Rocket Launchers 1941–Present*. Oxford: Osprey Publishing. <https://www.ospreypublishing.com/us/katyusha-9781472810861/>
- Hill, A. (2021). *The Red Army and the Second World War: Assessing Combat Effectiveness*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139107785>
- Rottman, G. L. (2020). Soviet Field Artillery in World War II. *Military History Review*, 45(2), 201–219. <https://tinyurl.com/lym5c8nrn>
- Du Plessis, J. L. (2023). *Artillery in the challenges of future warfare*. South African Ballistics Organisation, 1. <https://tinyurl.com/5fx3p4y4>

# Design and Optimization of a Hybrid Gas Generator for Hydrogen Peroxide Tank Pressurization

Mykhailo Vorobei , Mykola Bondarenko 

**Purpose.** This study develops a pressurization system for hydrogen peroxide tanks using a hybrid gas generator powered by liquid oxygen and solid fuel. The system aims to improve hybrid rocket engine efficiency and reliability by stabilizing oxidizer tank pressure. Applications in space and defense are considered, where performance and safety are essential. Technical parameters and system efficiency are evaluated in terms of design, materials, and combustion processes. **Design / Method / Approach.** The study combines experimental methods and theoretical modeling to examine hybrid gas generator and pressurization system parameters. Thermal loads, tank pressure, and combustion reactions are modeled. Erosion and cooling efficiency are analyzed to assess durability. **Findings.** The system effectively maintains stable hydrogen peroxide tank pressure, ensuring continuous oxidizer supply. Ceramic coatings and heat-resistant materials reduce erosion, and liquid oxygen flow control optimizes combustion. Aluminum addition to the fuel boosts specific impulse by 25 seconds. **Theoretical Implications.** This research advances knowledge on hybrid systems in rocket engines and demonstrates hydrogen peroxide's efficiency as an oxidizer. Hybrid gas generators show promise in improving rocket system performance and reliability for space and defense applications. **Practical Implications.** The system may enable more reliable, reusable rocket engines for maneuvering and be applicable in commercial and scientific missions where safety and cost are priorities. **Originality / Value.** This study presents a novel hybrid gas generator approach using hydrogen peroxide, showing how innovative materials enhance rocket system reliability and efficiency. Results benefit engineers seeking to improve space and defense systems. **Research Limitations / Future Research.** Current work is confined to lab settings and theoretical analysis. Future research could explore real-condition experiments and cooling system optimization for extended use. **Paper Type.** Technical Note.

## Keywords:

pressurization system, hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ), hybrid gas generator, control of oxidizer-to-fuel ratio (O/F)

## Contributor Details:

Mykhailo Vorobei, PhD candidate, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, vorobei\_m@365.dnu.edu.ua.

Mykola Bondarenko, PhD candidate, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, m.bondarenko@ftf.dnu.edu.ua.



Rocket technologies continue to develop rapidly, with one of the primary objectives being the creation of efficient and safe systems for fuel and oxidizer delivery in propulsion systems. Hybrid rocket engines, which combine a liquid oxidizer and solid fuel, offer distinct advantages over traditional liquid and solid-propellant engines. They provide increased safety, enhanced thrust control, and operational simplicity, making them attractive options for modern space and defense missions (Glaser et al., 2023). Maintaining stable pressure within oxidizer tanks is critical for continuous delivery to the combustion chamber. A promising solution for hybrid engines involves pressurizing the hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) tank using a hybrid gas generator powered by liquid oxygen (LOX) and solid fuel (HTPB). This approach stabilizes tank pressure, enhancing oxidizer delivery and engine reliability.

Hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) is employed as the primary oxidizer in this system. Upon decomposition into water and oxygen,  $H_2O_2$  releases significant heat, making it effective for use in rocket propulsion systems. With concentrations above 85%, hydrogen peroxide is a powerful and stable oxidizer that has seen wide application in rocketry. In the proposed pressurization system, a liquid-oxygen gas generator produces hot gases that pressurize the  $H_2O_2$  tank, maintaining the pressure required for oxidizer delivery.

The hybrid gas generator, utilizing liquid oxygen and solid fuel (HTPB), is a key component of this system. It initiates combustion, producing hot gases ( $CO_2$  and  $H_2O$ ) directed into the hydrogen peroxide tank to create the necessary pressure. A major advantage of hybrid systems is their ability to function with minimal moving parts, increasing reliability and simplifying operation. Using the same solid fuel in both the gas generator and propulsion system also improves efficiency and reduces system mass. One significant benefit of hybrid systems is the precise control of the oxidizer-to-fuel ratio (O/F), which supports stable combustion and high system efficiency. Adjustable LOX injectors allow combustion optimization based on operational conditions, which is particularly valuable when the engine's operational mode changes (Cantwell et al., 2010).

In conclusion, the proposed hydrogen peroxide tank pressurization system using a hybrid gas generator presents a promising solution for modern rocket technology, offering a combination of reliability, efficiency, and control flexibility. These characteristics make it suitable for a range of rocket missions.

## Research question

Can a hybrid gas generator powered by liquid oxygen and solid fuel stabilize the pressure in a hydrogen peroxide tank to enhance the efficiency and reliability of hybrid rocket engines used in space and defense applications?

## Data and methods

To achieve the study's objectives, both experimental data and theoretical modeling results are employed. The experiments analyze thermal loads, hydrogen peroxide tank pressure, and combustion processes in the hybrid gas generator, fueled



by liquid oxygen (LOX) and solid fuel (HTPB). The modeling examines combustion reactions, particularly the formation of  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  gases, which are used to pressurize the oxidizer tank. Additionally, the study assesses erosion and cooling efficiency to ensure system durability. Liquid oxygen flow is regulated through adjustable injectors to optimize combustion and improve system stability.

## Literature review and patent analysis

Hybrid engines leverage the benefits of liquid and solid propulsion systems. Their inherent safety, due to separate oxidizer and fuel storage, reduces ignition risks compared to liquid engines (Shih-Sin et al., 2024). Hybrid engines also allow for precise thrust control via adjustable oxidizer delivery, a key advantage in missions requiring variable power output.

Patent NASA CR-183975: Details optimized oxidizer feed systems and injector designs for LOX-HTPB hybrids, enhancing combustion stability and safety (Claflin & Beckman, 1989).

Patent EP654321: Highlights erosion-resistant coatings for high-temperature components, extending system lifespans.

Scientific Studies: Research on aluminum additives to solid fuel shows improved calorific value and increased specific impulse (Glaser et al., 2023; Meng et al., 2024).

These advancements underscore the hybrid system's suitability for modern aerospace applications.

## Description of the system design

The design of hybrid pressurization systems utilizing liquid oxygen (LOX) and solid fuel (HTPB) requires high precision and efficiency to ensure stable engine performance. This section provides an in-depth review of the system components, their functions, and the processes involved in pressurizing the hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) tank.

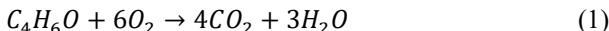
The  $\text{H}_2\text{O}_2$  storage tank is a sealed container engineered to withstand high pressures and varying temperatures. Hydrogen peroxide is used at concentrations exceeding 85%, providing an effective and stable oxidizer suitable for rocket applications. The tank must maintain consistent pressure levels to ensure reliable  $\text{H}_2\text{O}_2$  delivery to the combustion chamber. This pressurization is achieved through hot gases generated by the hybrid gas generator and directed into the tank.

A primary challenge in working with  $\text{H}_2\text{O}_2$  lies in managing its thermal stability. Elevated temperatures can accelerate  $\text{H}_2\text{O}_2$  decomposition, posing a safety risk. To mitigate this, the tank is constructed from heat-resistant materials and incorporates temperature control mechanisms, maintaining  $\text{H}_2\text{O}_2$  within safe operating limits.

The hybrid gas generator is a critical component of the pressurization system, generating the hot gases needed for  $\text{H}_2\text{O}_2$  tank pressurization. The generator combusts HTPB solid fuel in the presence of liquid oxygen (LOX), with HTPB providing high stability and LOX acting as the oxidizer. During combustion, HTPB

reacts with LOX, producing carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and water vapor (H<sub>2</sub>O) as primary combustion products. The reaction can be represented by the equation:

Combustion Equation:



These combustion gases are directed into the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tank to create the required pressure. To enhance fuel performance, additives such as aluminum or aluminum hydrides (AlH<sub>3</sub>) are introduced, which increase fuel density and boost the specific impulse (Isp) of the system (Cantwell et al., 2010).

Although H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> itself can decompose to generate pressurizing gases, LOX is employed to achieve higher energy release and cleaner combustion products. Unlike peroxide-only systems, this hybrid approach ensures more stable tank pressurization and efficient oxidizer delivery.

The solid fuel includes additives such as aluminum or aluminum hydrides (AlH<sub>3</sub>) to increase fuel density and calorific value, boosting specific impulse. An alternative composition, based on crotonaldehyde (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O), is suggested due to its low melting point (<-100°C), allowing better thermal management in cryo-genic conditions.

The gas product delivery system channels hot combustion gases from the hybrid gas generator to the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tank. Given the high temperatures involved, these pipelines must be constructed from heat-resistant and erosion-resistant materials. Ceramic coatings are applied to the inner surfaces, significantly enhancing thermal stress resistance and preventing pipeline degradation. The use of high-temperature materials and insulation throughout the system minimizes heat loss and pressure fluctuations, ensuring stable pressurization.

To ensure safe operation, advanced cooling systems and thermal barriers are employed to reduce gas temperatures below 1500°C before entering the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tank. This is essential for preventing thermal damage to the tank walls and maintaining structural integrity.

The combustion chamber of the gas generator must withstand intense thermal and mechanical loads. Studies recommend using ceramic coatings to shield the chamber walls from erosion and damage caused by high-temperature combustion products. These coatings extend the operational life of the combustion chamber and nozzles, enabling prolonged operation without frequent component replacements.

Nozzles are essential for directing the flow of hot gases into the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tank. Their shape and design are optimized to facilitate efficient energy transfer and pressurization. By carefully controlling the direction and velocity of gas flow, the system achieves precise pressure levels within the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tank.

Adjustable injectors control the precise delivery of liquid oxygen (LOX) into the combustion chamber, enabling the adjustment of oxidizer flow rates based on engine conditions. This feature is essential for maintaining an optimal oxidizer-to-fuel (O/F) ratio, which is critical for stable combustion and maximizing system efficiency. The adjustable geometry of these injectors ensures optimal combustion even as flight conditions change, minimizing risks associated with instability in the combustion process.

## System operation process

The hybrid pressurization system operates through a sequence of precisely controlled steps to ensure reliable performance and safety.

The process begins with injecting liquid oxy-gen (LOX) into the combustion chamber of the hybrid gas generator. LOX is delivered via adjustable injectors, which ensure an even distribution of the oxidizer over the surface of the solid fuel (HTPB). Since LOX is a cryogenic substance, it is stored and transported at extremely low temperatures, requiring sealed and insulated systems to prevent leakage and evaporation.

The flow of LOX is controlled in real time to maintain a stable oxidizer-to-fuel (O/F) ratio, which is crucial for efficient combustion and system stability.

Once the LOX reaches the chamber, the solid fuel (HTPB) is ignited. Combustion occurs, releasing a significant amount of heat and producing hot gases, primarily carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and water vapor (H<sub>2</sub>O). The chemical reaction is represented as (1).

The hot combustion products are directed into the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tank to generate the required pressure for oxidizer delivery. Aluminum additives in the solid fuel enhance the calorific value, leading to increased specific impulse and better overall efficiency.

The gases are transferred through pipelines made from heat-resistant materials with ceramic coatings to prevent erosion and degradation caused by high temperatures.

Once pressure is established in the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tank, the oxidizer is fed into the engine's combustion chamber. Hydrogen peroxide decomposes into water and oxygen, releasing significant heat according to the reaction:



This reaction provides oxygen for oxidizing the solid fuel in the main engine, generating thrust. Catalysts can be used to accelerate H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> decomposition, enhancing reaction efficiency and oxidizer delivery speed (Cantwell et al., 2010).

A key aspect of the hybrid system's operation is managing the oxidizer-to-fuel ratio (O/F). This ratio can vary during different flight stages, requiring precise LOX flow control. Adjustable injectors allow modification of the flow rate based on the system's current requirements.

An optimal O/F ratio ensures combustion stability and engine efficiency. An increase in the O/F ratio beyond optimal levels can lead to oxidizer deficiency, resulting in unstable combustion and reduced efficiency. Studies propose solutions for optimizing oxidizer delivery, enabling the system to maintain a stable O/F ratio throughout the flight.

Hybrid systems offer the flexibility of thrust control through precise LOX flow management. Adjusting the oxidizer delivery allows modification of engine operation modes, which is especially important under varying flight loads. Accurate thrust control is achieved by regulating pressure in the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tank and controlling oxygen delivery (Glaser et al., 2023).

## Limitations and challenges

Despite numerous advantages, the proposed pressurization system based on a hybrid gas generator also encounters certain limitations that must be considered to ensure reliability and efficiency under real-world conditions.

**Thermal Resistance and Erosion Protection:** A major limitation of the system is the high temperature generated during fuel combustion, reaching up to 3000 K. Even with the use of ceramic coatings and high-temperature-resistant materials, prolonged exposure to such extreme temperatures may lead to material degradation and reduced efficiency over time. Future research may focus on developing more durable materials and coatings that would enable the system to withstand extreme thermal loads during long missions.

**Instability of the Oxidizer-to-Fuel (O/F) Ratio under Variable Conditions:** Controlling the oxidizer-to-fuel (O/F) ratio is critical for combustion stability and system efficiency. Under varying pressure conditions or as fuel is consumed, instability in the O/F ratio may occur, resulting in deviations from the optimal ratio. This could lead to unstable combustion and a decrease in specific impulse. Further studies could focus on the development of more precise and adaptive oxidizer delivery systems that automatically adjust supply in response to changing conditions.

**Pressure Control in the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Tank:** Maintaining stable pressure within the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tank is essential, but fluctuations in temperature and the intensity of incoming hot gases can lead to variations that may trigger uncontrolled decomposition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. This poses potential safety risks to the system. To mitigate this, highly sensitive sensors and effective temperature and pressure monitoring systems are required to promptly respond to changes.

**Longevity Limitations for Long-Term Missions:** While the use of high-temperature ceramic coatings enhances component lifespan, repeated thermal cycles and loads in long-duration missions, such as interplanetary flights, may compromise system durability. This limitation calls for additional research into coatings with even higher resilience to thermal fluctuations, ensuring consistent performance over extended missions.

## Comparison with Traditional Systems

Hybrid engines using LOX and HTPB occupy an intermediate position between liquid and solid rocket engines, combining some of their respective advantages with certain constraints.

**Compared to Liquid Rocket Engines:** Liquid rocket engines provide high specific impulse and precise thrust control but rely on complex delivery systems with numerous moving parts, which increase the risk of malfunctions and maintenance costs. In contrast, hybrid systems have simpler designs with fewer moving components, enhancing reliability and reducing maintenance costs. However, hybrid systems are still less capable of real-time control precision compared to liquid engines, particularly under variable operating modes.

**Compared to Solid Rocket Engines:** Solid rocket engines are known for high

fuel density and low operating costs but lack flexible thrust control. Hybrid engines offer flexibility in O/F ratio adjustment, making them better suited for missions with changing loads. However, hybrid systems tend to have lower thermal resistance than solid systems, which may require additional thermal insulation measures.

Environmental Sustainability and Safety: Hybrid systems using  $\text{H}_2\text{O}_2$  as an oxidizer are less toxic and safer to handle compared to liquid oxidizers like  $\text{N}_2\text{O}_4$ , making them a more environmentally sustainable choice for space missions. Compared to traditional solid and liquid systems, hybrid engines with  $\text{H}_2\text{O}_2$  also produce fewer toxic emissions, an essential consideration for long-term space missions.

Thus, hybrid systems offer a unique set of advantages and limitations. They present a compromise between control flexibility and design simplicity, making them promise for multipurpose and reusable missions as well as interplanetary exploration. Future research should focus on optimizing these systems to improve their performance and resilience under real flight conditions.

## Calculations and analysis

To comprehensively evaluate the efficiency and performance of the hybrid pressurization system based on liquid oxygen (LOX) and solid fuel (HTPB), several critical calculations are essential. These include determining the pressure in the hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) tank, specific impulse, thermal loads on components, and overall system efficiency, particularly with the addition of aluminum-based fuel additives.

### Calculation of pressure in the $\text{H}_2\text{O}_2$ tank

The hydrogen peroxide is stored under pressure, which is maintained by hot gases generated from the hybrid gas generator. The pressure in the  $\text{H}_2\text{O}_2$  tank can be calculated using the ideal gas law:

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \quad (3)$$

where:  $P$  – is the pressure in the tank;  $n$  – is the number of moles of gas;  $R$  – is the universal gas constant ( $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ );  $T$  – is the gas temperature;  $V$  – is the tank volume.

Accurately determining this pressure requires knowledge of the tank volume, the temperature of the gases, and the total moles of gas produced during combustion. The combustion products, primarily carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) and water vapor ( $\text{H}_2\text{O}$ ), are channeled into the tank to generate sufficient pressure for consistent  $\text{H}_2\text{O}_2$  delivery to the combustion chamber (Glaser et al., 2023).

### Calculation of system specific impulse

Specific impulse ( $I_{sp}$ ) is a fundamental parameter for assessing rocket engine efficiency and is calculated as follows:

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m} \cdot g_0} \quad (4)$$

where:  $F$  – is the engine thrust;  $\dot{m}$  – is the mass flow rate of the fuel;  $g_0$  – is the standard gravitational acceleration ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).

The inclusion of aluminum or its hydrides (e.g.,  $\text{AlH}_3$ ) as additives in the solid fuel significantly boosts fuel density, thereby enhancing the specific impulse of the system. Studies indicate that aluminum additives can increase  $I_{sp}$  by as much as 25 seconds, which translates to substantial improvements in system efficiency (Cantwell et al., 2010).

### **Thermal loads and cooling**

The high temperatures resulting from the combustion of HTPB with LOX necessitate a detailed evaluation of thermal loads on system components. Combustion temperatures can reach up to 3000 K, exerting considerable thermal stress on the combustion chamber walls and nozzles. To calculate thermal loads on the chamber walls, the following equation for heat flux ( $Q$ ) is used:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_{gas} - T_{wall}) \quad (5)$$

where:  $Q$  – is the heat flux;  $\alpha$  – is the heat transfer coefficient;  $A$  – is the heat exchange area;  $T_{gas}$  – is the gas temperature;  $T_{wall}$  – is the wall temperature.

To mitigate thermal degradation and reduce erosion, ceramic linings with high heat resistance are applied to chamber walls and nozzles. This protective measure significantly reduces the risk of overheating and component failure. Various active and passive cooling technologies, as described in recent studies, enhance component resilience to thermal stress (Claflin & Beckman, 1989).

### **System efficiency with fuel additives**

Fuel additives, particularly aluminum or its hydrides, are proven to increase fuel density and calorific value. Studies show that aluminum addition can improve the fuel's energy output by 15–20%, contributing to a higher specific impulse and enhanced engine performance. These enhancements are achieved without significantly increasing the system's overall mass, making aluminum additives a cost-effective means to boost efficiency.

Further improvements are attainable by optimizing the oxidizer-to-fuel (O/F) ratio. Maintaining an optimal O/F ratio is essential in hybrid systems, as deviations can lead to unstable combustion. The use of adjustable LOX injectors allows for precise control of the O/F ratio, ensuring stable combustion across all phases of operation.

### **Advantages of the system**

The proposed hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) tank pressurization system, which utilizes a hybrid gas generator with liquid oxygen (LOX) and solid fuel (HTPB), offers substantial advantages over traditional oxidizer and fuel delivery systems.

These benefits encompass both technical design improvements and practical applications suited for rocket and space missions.

### ***Compactness and reliability***

A key advantage of the proposed system is its compact design and high reliability. Hybrid systems typically have fewer moving parts than liquid rocket engines, which reduces the likelihood of malfunctions and simplifies maintenance. For instance, the hybrid gas generator in this system utilizes the same solid fuel (HTPB) for generating hot gases for pressurization and providing primary thrust, thus minimizing the need for multiple fuel components.

Additionally, using  $\text{H}_2\text{O}_2$  as an oxidizer enhances safety relative to more hazardous traditional liquid oxidizers, such as nitrogen tetroxide ( $\text{N}_2\text{O}_4$ ), which pose higher toxicity and handling risks.

### ***Increased specific impulse***

Adding aluminum compounds to the solid fuel has been shown to increase the system's specific impulse. Studies indicate that aluminum or its hydrides can significantly boost the calorific value of the fuel, thereby improving combustion efficiency and raising specific impulse by up to 25 seconds. This improvement is particularly advantageous for space missions where higher fuel performance contributes to reducing rocket mass and extending flight range, enabling hybrid systems to compete effectively with both liquid and solid rocket engines.

### ***Thrust control flexibility***

Hybrid engines are notable for their flexibility in thrust control. The use of adjustable injectors for LOX delivery enables variation in oxidizer flow into the combustion chamber, facilitating precise thrust management based on real-time flight conditions. This flexibility is especially beneficial for missions with variable loads or changing objectives, as it enables hybrid systems to be used for both lift-off and in-flight orbital adjustments.

### ***Safety and environmental sustainability***

Hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) as an oxidizer offers distinct safety and environmental benefits.  $\text{H}_2\text{O}_2$  is less toxic than alternatives like hydrazine or  $\text{N}_2\text{O}_4$ , making it safer for handling and storage. Furthermore,  $\text{H}_2\text{O}_2$  decomposes into water and oxygen, producing no harmful byproducts, which supports environmental sustainability in space missions.

In addition,  $\text{H}_2\text{O}_2$  is easily stored and transported under cryogenic or insulated conditions, simplifying the infrastructure required for its use. These characteristics make  $\text{H}_2\text{O}_2$  an ideal oxidizer for both launch vehicles and small satellite propulsion systems, broadening its practical applicability.

---

## ***Extended system lifespan***

The use of advanced materials, such as heat-resistant ceramic coatings, significantly extends the lifespan of system components. Ceramic coatings protect combustion chamber walls and nozzles from erosion, reducing the need for frequent maintenance and replacements. This advantage is especially important for space missions, where access to maintenance is limited, and it minimizes the risk of in-flight failures, which is essential for long-duration missions like interplanetary exploration.

## ***Application in multipurpose missions***

Thanks to its unique attributes—such as compactness, flexibility in thrust control, and an optimal fuel-to-oxidizer ratio—the proposed hybrid system is suitable for a broad range of missions. This includes suborbital flights, interplanetary missions, and reusable rockets where reliability and efficiency are paramount. Hybrid systems are particularly promising for use in reusable rockets and small satellites, offering high performance at relatively low operational costs.

## ***Practical applications and prospects***

Hybrid rocket systems, like the one proposed, have applications across various fields, including space exploration and defense, owing to their combination of high performance, thrust control flexibility, and reliability. This section explores practical examples, potential for scientific and commercial missions, and future technological advancements.

## ***Examples of practical applications***

Hybrid rocket engines have demonstrated their potential in successful launches, such as the suborbital commercial vehicle SpaceShipOne, which used a hybrid engine with nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) and HTPB. This project highlighted the safety and flexibility of hybrid systems, establishing a foundation for future commercial developments. Hybrid engines also support the launch of small satellites (CubeSats) and compact payloads. Their simplified design and fewer moving parts make them well-suited for small- and medium-sized satellites, where efficiency, weight, and cost are key considerations. Additionally, these systems can be adapted for reusable rockets and multi-mission platforms.

## ***Prospects for space missions***

Hybrid engines hold significant potential for interplanetary missions, where reliability and efficiency are essential. The ability to precisely control thrust makes them suitable for missions with diverse objectives, such as orbital adjustments or maneuvers. For instance, hybrid engines could facilitate the delivery of scientific instruments to planetary orbits or support trajectory adjustments during interplanetary flights. Their long-duration operational capability and minimal maintenance



requirements make hybrid engines ideal for planetary exploration missions.

Furthermore, hybrid systems are adaptable for lunar and Martian missions, where durability and reliability are vital. These systems could serve as primary propulsion for landing and in-orbit maneuvers on extraterrestrial surfaces.

### **Potential for reusable rockets**

An emerging trend in space technology is the development of reusable rockets, which can perform multiple flights with minimal refurbishment. Hybrid propulsion systems are well-suited to this purpose due to their simplified design, resistance to thermal loads, and low operational costs. The use of durable materials, such as ceramic coatings, extends component lifespan, reducing the need for frequent replacement and repair.

Reusable rockets equipped with hybrid engines could be employed for commercial satellite launches and scientific research missions. As interest in reusable systems grows, hybrid engines offer a cost-effective and reliable solution.

### **Opportunities for optimization and further development**

Despite notable progress, hybrid rocket systems continue to evolve. Key optimization areas include fuel efficiency enhancement through additives like aluminum compounds, which increase energy density and reduce system mass. Studies indicate that such additives can increase the fuel's calorific value by 15–20%, resulting in marked performance improvements.

Further research areas include advanced materials for improved thermal resistance, optimized oxidizer delivery systems, and refined control over the oxidizer-to-fuel (O/F) ratio. Active cooling technologies are also being explored to enhance system reliability under extreme conditions.

### **Commercial potential**

Hybrid engines present an ideal solution for commercial companies aiming to reduce space launch costs. Their simplicity and safety make them attractive for private firms involved in launching small satellites and conducting suborbital flights. Furthermore, hybrid engines can be incorporated into reusable rockets, offering new opportunities to reduce commercial launch expenses.

### **Key findings**

1. **Compactness and Reliability:** Hybrid systems are characterized by their compact and robust design, which minimizes the number of moving parts, reducing mechanical complexity and failure rates. Utilizing the same solid fuel (HTPB) in both the gas generator and the main engine decreases the overall system mass and simplifies operation, enhancing reliability and efficiency.

2. **Increased Specific Impulse:** The addition of aluminum to the solid fuel notably boosts specific impulse, increasing it by up to 25 seconds. This enhancement

in performance positions hybrid systems as competitive alternatives to traditional rocket engines, especially in missions where fuel efficiency is critical.

3. Thrust Control Flexibility: Adjustable LOX injectors enable precise thrust management, offering the ability to adapt to real-time flight conditions. This flexibility makes hybrid systems suitable for reusable and multipurpose missions, including liftoff, in-flight orbital adjustments, and interplanetary maneuvers.

4. Environmental Sustainability and Safety: The use of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) as an oxidizer reduces toxicity, offering a safer and more environmentally friendly alternative compared to conventional oxidizers like nitrogen tetroxide ( $N_2O_4$ ) or hydrazine.

5. Technical Solutions for Durability and Stability: Advanced ceramic coatings and adjustable injectors contribute to the system's durability and thermal stability. These patented solutions prevent component erosion and high-temperature damage, thereby extending the system's lifespan and improving operational safety.

## Conclusion

This article has presented a comprehensive analysis of a hybrid gas generator system utilizing liquid oxygen (LOX) and solid fuel (HTPB) for pressurizing a hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) tank in rocket propulsion applications. Through an in-depth examination of system design, combustion processes, technical challenges, and performance metrics, this study integrates findings from scientific literature and patents, laying a strong foundation for advancements in hybrid propulsion technologies.

The analysis underscores the distinct benefits of hybrid systems:

- The simplified architecture minimizes moving parts, enhancing reliability and reducing maintenance demands.
- The combination of LOX and HTPB, further improved with aluminum additives, achieves high specific impulse and better engine efficiency.
- The use of  $H_2O_2$  as the oxidizer provides a safer and more environmentally friendly alternative to conventional options, making this system suitable for a wide range of commercial and scientific missions.

Experimental and theoretical findings confirm the feasibility and scalability of this technology, making it well-suited for reusable rocket designs and interplanetary missions. The hybrid system demonstrates its potential in addressing the critical needs of reliability, efficiency, and sustainability, all of which are paramount in modern aerospace applications.

Future research directions:

- Exploring advanced fuel additives and formulations to enhance performance and energy density.
- Investigating high-temperature and erosion-resistant materials for prolonged operational lifespans.
- Developing more adaptive and precise oxidizer injection technologies to

maintain stable combustion under varying conditions.

Improving cooling systems to handle extreme thermal loads efficiently.

Moreover, conducting real-condition tests and long-term durability studies will provide critical insights into transitioning this hybrid propulsion system into operational environments. These advancements could play a transformative role in the future of hybrid propulsion systems, particularly for space exploration and defense applications.

## References

- Cantwell, B., Karabeyoglu, A., & Altman, D. (2010). Recent advances in hybrid propulsion. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 9(4), 305–326. <https://doi.org/10.1615/intjenergeticmaterialschemprop.v9.i4.20>
- Carmicino, C., & Russo Sorge, A. (2015). Experimental investigation into the effect of solid-fuel additives on hybrid rocket performance. *Journal of Propulsion and Power*, 31(2), 699–713. <https://doi.org/10.2514/1.B35383>
- Claflin, S. E., & Beckman, A. W. (1989). *Hybrid propulsion technology program: Phase 1, volume 4* (No. RI/RD89-261-VOL-4). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19910000801>
- Glaser, C., Hijlkema, J., & Anthoine, J. (2023). Bridging the technology gap: Strategies for hybrid rocket engines. *Aerospace*, 10(10), 901. <https://doi.org/10.3390/aerospace10100901>
- Kamps, L., Hirai, S., & Nagata, H. (2021). Hybrid rockets as post-boost stages and kick motors. *Aerospace*, 8(9), 253. <https://doi.org/10.3390/aerospace8090253>
- Meng, X., Tian, H., Niu, X., Zhu, H., Gao, J., & Cai, G. (2024). Long-Duration Dynamic Numerical Simulation of Combustion and Flow in Hybrid Rocket Motors Considering Nozzle Erosion. *Aerospace*, 11(4), 318. <https://doi.org/10.3390/aerospace11040318>
- Shih-Sin, W., Meng-Che, L., Lai, A., Chou, T. H., & Jong-Shinn, W. (2024). A Review of Recent Developments in Hybrid Rocket Propulsion and Its Applications. *Aerospace*, 11(9), 739. <https://doi.org/10.3390/aerospace11090739>

# Mathematical model for heat transfer in variable thickness fins for rocket engines

Volodymyr Sliusariiev , Valerii Bucharskyi 

**Purpose.** This article aims to develop a mathematical model for a fin in the cooling system of liquid propellant rocket engines. The objective is to enable calculations for fins with arbitrary thickness variation. The developed mathematical model will be valuable and in demand for calculating heat transfer in the chambers of liquid propellant rocket engines produced using additive manufacturing technologies. **Design / Methodology / Approach.** The study employs theoretical research methods. The temperature distribution along the fin's height is derived by applying established heat transfer laws to the control volume under consideration. **Findings.** The study resulted in a mathematical model for a fin of variable thickness. The model was transformed into a dimensionless form to improve the accuracy of solving the equation numerically. Next, test calculations were performed using the proposed model. **Theoretical Implications.** This study builds upon existing models of heat transfer in fins and significantly extends the scope for further analysis by allowing for arbitrary variations in fin thickness. **Practical Implications.** The developed mathematical model can be applied to calculate the fin efficiency when designing cooling systems for combustion chambers, gas generators, and other components of liquid propellant rocket engines. **Originality / Value.** The article presents an original approach to calculating heat transfer in fins with variable thickness, enhancing its value for practical calculations. It can also serve as a reference for developing similar mathematical models. **Research Limitations / Future Research.** This study is focused on fins used in the cooling systems of liquid propellant rocket engine chambers. Therefore, the developed model is applicable only to fins where the longitudinal dimension significantly exceeds the transverse dimension. Future research could explore optimizing fin shapes to enhance heat transfer efficiency. **Article Type.** Applied Research.

## Keywords:

variable thickness fin, mathematical model of heat transfer, liquid propellant rocket engine, cooling system of engine chamber, additive manufacturing, fin efficiency

## Contributor Details:

Volodymyr Sliusariiev, Ph.D student., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [sliusariiev@ftf.dnu.edu.ua](mailto:sliusariiev@ftf.dnu.edu.ua)

Valerii Bucharskyi, Ph.D., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [bucharskyi@ftf.dnu.edu.ua](mailto:bucharskyi@ftf.dnu.edu.ua)



Over the years of rocket and space technology development, a robust theory of fin design has been established. However, the challenge of selecting the most optimal parameters for the cooling system remains unresolved (Leonardi et al., 2019; Desai & Kuzhiveli, 2022). This is due to the numerous factors that influence the process, as heat transfer through the finned surface depends on the geometric parameters of both the channel and the fin, the thermal conductivity of the wall material, the heat transfer coefficient, and more.

Furthermore, the authors of existing fin models were constrained by the manufacturing technologies available at the time, limiting the analysis to straight, triangular, and trapezoidal fin shapes. Recently, this situation has changed with the rise of a new and increasingly popular technology for producing liquid propellant rocket engine (LPRE) chambers – additive manufacturing (Vekilov et al., 2021). The development of technical capabilities for producing complex-shaped structures has created a demand for new modeling and analysis methods to fully leverage these advancements. A prime example of such technological progress is illustrated in the article (Bondarenko & Tkachov, 2024). The use of 3D printing effectively eliminates the limitations imposed by traditional manufacturing methods, such as milling, assembling tubular chambers, or using corrugated spacers. Therefore, this study will focus on ribs with variable thickness and arbitrary shapes.

Moreover, the modern advancements in computing technology eliminate the need for compact and simplified analytical expressions in calculations, enabling the use of more efficient numerical models (Алексеєнко & Бучарський, 2024; Dubrovskiy & Bucharskiy, 2023).

The developed model is designed to complement the previously proposed mathematical model of the cooling system for liquid propellant rocket engine chambers (Бучарський & Слюсарев, 2024). The presented approaches to heat transfer calculation can enhance cooling system efficiency. This improvement could help address issues related to thermal loads in efficient aerospike nozzles, as described in (Золотьюко, 2024).

In addition, the developed mathematical models are applicable not only to LPRE chambers but also to other components, such as gas generators, flow-cooled turbine stators, heat exchangers. For instance, reducing the mass and improving the efficiency of the heat exchanger's finned surface represent important steps for advancing pressurization system, as noted in (Мітіков & Седченко, 2023).

## Objective and Tasks

The objective of this study is to develop a mathematical model for a LPRE cooling fin with an arbitrary thickness variation.

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

- derive an equation for the temperature distribution along the fin's height based on established heat transfer laws, select appropriate boundary conditions, and reduce the equation to a dimensionless form;
- conduct test calculations to verify the accuracy of the developed model.

## Materials and Methods

This study examines the cooling system of the LPRE chamber featuring a fin with a variable cross-section (see Fig. 1).

The effects of the combustion chamber and the outer wall will not be considered, and the symmetry of the fin allows us to analyze only half of it for the sake of computational convenience. For the portion of the fin under consideration, we will establish a Cartesian coordinate system, define the primary geometric dimensions, and designate an elemental volume,  $\Delta x$  (see Fig. 2).

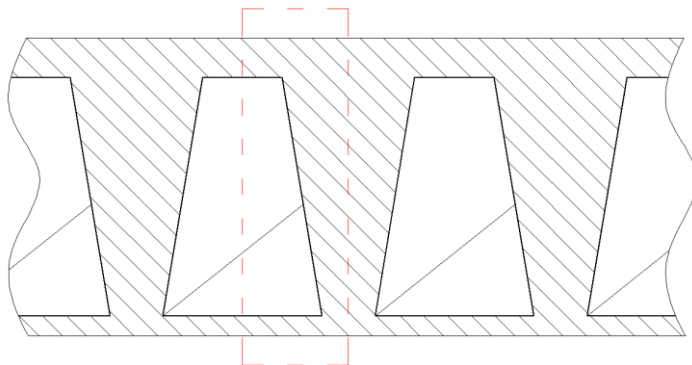


Figure 1 – Cooling channels of the LPRE chamber (Source: Authors)

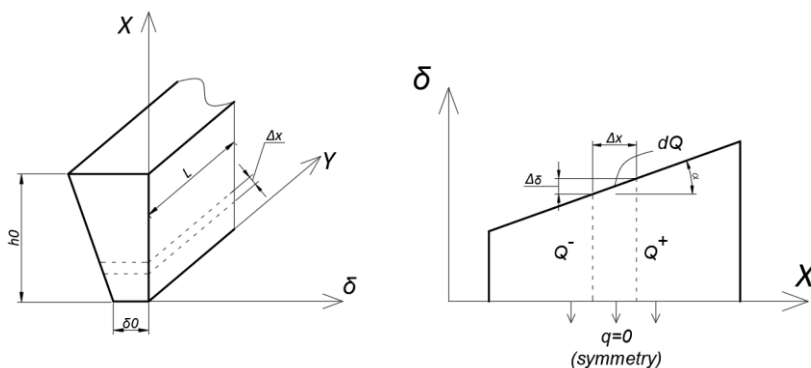


Figure 2 – Section of the fin under consideration (Source: Authors)

The study focuses on tall, thin fins made from materials with high thermal conductivity. This implies that temperature variations along the thickness of the fin can be neglected, making the fin temperature a function of its height. Additionally, it is assumed that the heat transfer coefficient between the fin and the coolant is known and remains constant along the entire height of the fin. The data used for the test calculations are presented in Table 1.

**Table 1 – Initial data for calculating heat transfer in a fin (Source: Authors)**

Parameter	Value
Half width of fin base, mm	0.5
Fin height, mm	3
Material thermal conductivity coefficient, Wt/m/K	300
Cooler heat transfer coefficient, Wt/m <sup>2</sup> /K	20000
Fin base temperature, K	900
Cooler temperature, K	300

Like the approach taken in (Yang & Naraghi, 2020), numerical methods for solving differential equations were employed to calculate complex geometries using the model. In this study, the fourth-order Runge-Kutta method, implemented in the NDSolve function of the Wolfram Mathematica software, was utilized for this purpose.

## Results

To develop the mathematical model, we apply the fundamental laws of heat transfer to the fin based on the established assumptions. According to Fourier's law, the heat flow through the left boundary of the control volume is given by:

$$Q^- = -\lambda^- \frac{dT^-}{dx} f^-,$$

where  $\lambda$  – thermal conductivity coefficient,  $T$  – temperature of the fin,  $f$  – cross-sectional area of the fin and  $x$  – coordinate along the height of the fin. The heat flow through the right boundary is calculated in a similar manner:

$$Q^+ = -\lambda^+ \frac{dT^+}{dx} f^+.$$

The amount of heat removed from the fin at the section  $\Delta x$ , according to the Newton equation, is given by:

$$dQ = \alpha (T - T_{liq}) S,$$

where  $S$  – lateral surface area of the fin. Therefore, the heat flow balance can be expressed as:

$$Q^- - dQ = Q^+,$$

can be rewritten as:

$$\lambda^+ \frac{dT^+}{dx} f^+ - \lambda^- \frac{dT^-}{dx} f^- = \alpha (T - T_{liq}) S. \quad (1)$$

In this case, the perimeter of the fin can be expressed as:

$$\Pi = 2\delta + L \approx L.$$

Then, the cross-sectional area is given by:

$$f = \delta L = \delta \Pi.$$

The lateral surface area is given by:

$$S = \Pi m,$$

where  $m$  – length of the generatrix, which can be expressed as follows:

$$m = \frac{\Delta x}{\cos(\alpha)},$$

where  $\alpha$  – inclination angle of the fin (see Fig. 2). We can use the basic trigonometric identity to convert the known quantities:

$$\frac{1}{\cos(\alpha)} = \sqrt{1 + \tan^2(\alpha)} = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta x}\right)^2}.$$

Then, the lateral surface area can be rewritten as:

$$S = \Pi \Delta x \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta x}\right)^2}.$$

By substituting the expressions for the geometric parameters into equation (1), we can divide both sides of the equation by  $\Pi \Delta x$  to obtain:

$$\frac{\lambda^+ \frac{dT^+}{dx} f^+ - \lambda^- \frac{dT^-}{dx} f^-}{\Delta x} = \alpha (T - T_{liq}) \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta x}\right)^2}.$$

Let  $\Delta x \rightarrow 0$  and take the limit:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \delta \frac{dT}{dx} \right) = \alpha (T - T_{liq}) \sqrt{1 + \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2}. \quad (2)$$

To close this equation, we will apply the following boundary conditions: we will assume that the wall temperature at the base of the fin is specified as:

$$\text{at } x = 0 \rightarrow T(0) = T_0,$$

and that the heat flow through the top of the fin is zero:

$$\text{at } x = h_0 \rightarrow \frac{dT}{dx} = 0.$$

Since the equation will be solved numerically, it must be transformed into a dimensionless form to minimize calculation errors. The parameters  $\alpha$ ,  $h_0$ ,  $T_0$  were selected as the fundamental quantities, with all other quantities expressed in terms of these. Taking this into account,

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha} = 1; \quad \bar{h}_0 = \frac{h_0}{h_0} = 1; \quad \bar{T}_0 = \frac{T_0}{T_0} = 1;$$

$$\bar{x} = \frac{x}{h_0}; \quad \bar{\delta} = \frac{\delta}{h_0}; \quad \bar{T} = \frac{T}{T_0}; \quad \bar{T}_{liq} = \frac{T_{liq}}{T_0}; \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\alpha h_0};$$

equation (2) can be expressed in dimensionless form as:



$$\frac{d}{d\bar{x}} \left( \bar{\lambda} \bar{\delta} \frac{d\bar{T}}{d\bar{x}} \right) = (\bar{T} - \bar{T}_{liq}) \sqrt{1 + \left( \frac{d\bar{\delta}}{d\bar{x}} \right)^2} ;$$

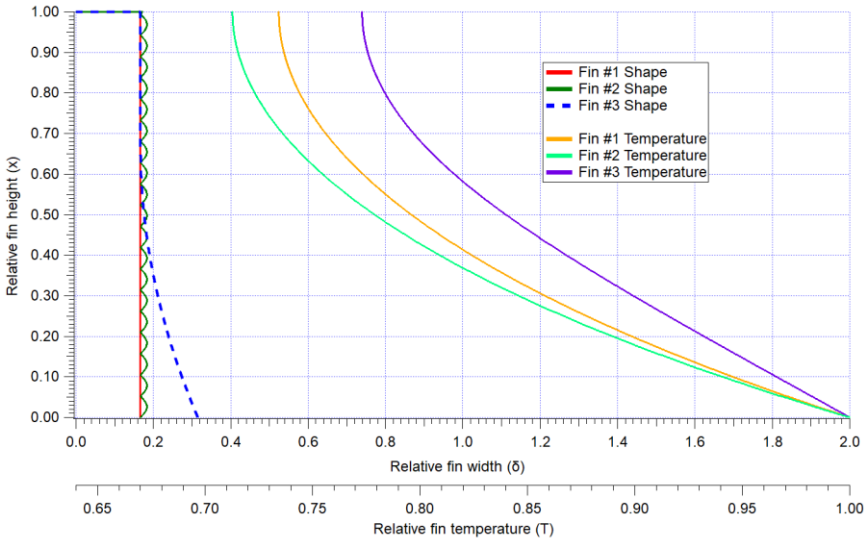
at  $\bar{x} = 0 \rightarrow \bar{T}(0) = 1;$

at  $\bar{x} = 1 \rightarrow \frac{d\bar{T}}{d\bar{x}} = 0.$

To verify the derived equation, test calculations of the temperature distribution in the fin were performed. Three variations of the fin shape were considered during the calculations:

1. straight fin;
2. wavy fin;
3. fin with a smooth thickening toward its base.

The results of solving this equation, using the initial data provided in Table 1 for the selected fin shapes, are presented in Figure 3.



**Figure 3 – Calculation Results Based on the Proposed Model (Source: Authors)**

As observed, the calculation results align with theoretical concepts regarding heat transfer processes in fins. For instance, as the lateral surface area of the fin increases (due to its waviness), the heat transfer process becomes more efficient, resulting in a decrease in the temperature at the top of the fin. Conversely, when there is a local thickening at the base of the fin, the amount of heat transferred to the fin increases, leading to a rise in the temperature at the top of the fin.

## Conclusions

In this study, a novel mathematical model of a fin with an arbitrary thickness variation was developed. To achieve this, a differential equation for temperature distribution along the height of the fin was derived based on established heat transfer laws. Subsequently, appropriate boundary conditions were selected, and the equation was transformed into a dimensionless form for numerical solution.

Test calculations were also performed using the developed model, confirming its accuracy.

Future work on this model can focus on refining the heat transfer processes in the fins. This may include accounting for variations in the material's thermal conductivity with changes in temperature, calculating the temperature distribution across the thickness of the fin, and conducting optimization calculations for fin design.

## References

- Bondarenko, O., & Tkachov, Y. (2024). Удосконалення масової ефективності силового корпусу насоса високого тиску. *Journal of Rocket-Space Technology*, 33(4), 118-124. <https://doi.org/10.15421/452416>
- Desai, R. P., & Kuzhiveli, B. T. (2022, May). Integrated modular design and analysis of liquid propellant rocket engine working on liquid methane-oxygen expander cycle. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1240, No. 1, p. 012014). IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1240/1/012014>
- Dubrovskiy, I., & Bucharskiy, V. (2023). Devising a method to design supersonic nozzles of rocket engines by using numerical analysis methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 126(1), 61–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.290583>
- Leonardi, M., Pizzarelli, M., & Nasuti, F. (2019). Analysis of thermal stratification impact on the design of cooling channels for liquid rocket engines. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135, 811-821. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.028>
- Vekilov, S. S., Lipovskiy, V. I., & Marchan, R. A. (2021). Features of the adaptation of 3D printed regenerative cooling channels of the LPRE throat inserts. *System design and analysis of aerospace technique characteristics*, 29(2), 62-72. <https://doi.org/10.15421/472112>
- Yang, J., & Naraghi, M. H. (2020). A fin analogy model for thermal analysis of regeneratively cooled rocket engines. In *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum* (p. 3817). <https://doi.org/10.2514/6.2020-3817>
- Алексєенко, В., & Бучарський, В. (2024). Математична модель системи наддування паливних баків з урахуванням теплообміну. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 91-95. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/162>
- Бучарський, В., & Слюсарєв, В. (2024). Диференційна модель тракту охолодження камери РРД. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 87-90. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/156>
- Золотько, О. (2024). Аналіз можливості удосконалення сопел ракетних двигунів. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 111-114. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/191>
- Мітків, Ю., & Седченко, М. (2023). Критичний аналіз гелієвих газобалонних систем наддування паливних баків ракетних двигунів. *Challenges and Issues of Modern Science*, 1, 117-125. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/23>

# Аналіз конструкцій та методика розрахунку мазутних пальників для опалювальних систем

Ігор Токарський , Володимир Габрінець 

**Purpose.** This article aims to show the principle and methodology of developing simple fuel oil burners for autonomous heating boilers that will provide room and water heating, making buildings independent of centralized heat supply. **Design / Method / Approach.** The research is based on the analysis of existing data on modern heating systems and their calculation methods for the synthesis of simple and compact solutions for the development of new burners. **Findings.** The result of the work is the disclosure of the operating principles of fuel oil burners, a comparison of their advantages and disadvantages. Based on these data, the simplest and most appropriate type of construction was chosen. The method of its calculation was revealed, which allows you to find its key dimensions and characteristics of the flame torch, which can be used for further calculation of the firebox based on this burner. **Theoretical Implications.** The study deepens the understanding of the principles of operation of liquid fuel burners and offers a new approach to their calculation, which can be the basis for further scientific developments in this field. **Practical Implications.** The disclosed method for calculating the burner makes it possible to obtain its dimensions and the characteristics of the flame torch in the furnace when the input parameters are changed. This makes it possible to quickly select the optimal option for various input data of the heating system without limiting yourself to the case presented in the article. **Originality / Value.** The novelty of the work is the creation of a relatively simple methodology for calculating fuel oil burners, which allows you to quickly develop optimal solutions for various heating systems. Specific numerical values allow you to compare the obtained system with analogues to identify its advantages and disadvantages. **Research Limitations / Future Research.** This study is somewhat limited in detail regarding some specific feed and combustion systems. This is due to their narrow role in heating systems, which are characteristic only for industrial enterprises and sea transport. The data obtained from this work will be the basis for calculating the heating boiler. **Paper Type.** Theoretical, Methodological.

## Keywords:

fuel oil burner calculation, burner optimization, heating system design, flame characteristics

## Contributor Details:

Ihor Tokarskiy, Postgraduate., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, tokarskiy097@gmail.com

Volodymyr Habrinets, Prof., Dr.Sc., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, gabrin62@gmail.com



На сьогоднішній день, через високий ризик пошкодження тепло- та електростанцій, актуально стоїть питання про забезпечення обігріву в холодні пори року робочих приміщень, таких як лікарні, школи, промислові та об'єкти підприємства.

Одним із варіантів розв'язання цієї задачі є встановлення резервних котлів, що будуть працювати на рідкому паливі, яке значно простіше доставляти автотранспортом у разі пошкодження центральних магістралей.

Для економії коштів паливом може бути мазут, який в декілька разів дешевший за дизельне пальне. Через те, що встановлення означених котлів розглядається як тимчасове рішення, потенційне забруднення навколишнього середовища буде низьким.

## Мета

Метою роботи є аналіз існуючих конструктивних рішень для створення мазутних пальників та побудова методики їх розрахунку. Насамперед необхідно мати можливість розрахувати геометричні параметри пальника, що відповідали б заданим початковим умовам, а також факелу полум'я, який він утворює. Ці дані дозволять почати розробку системи опалення на основі такого пальника.

## Дані та методи

Для ефективного спалювання в топці рідке пальне розпилюється під час подачі в топку котла. Далі, змішуючись із достатньою кількістю повітря, ця аерозольна суміш займається. Горіння мазуту відбувається головним чином в газовій фазі, коли його краплі випаровуються за рахунок тепла від факелу полум'я. Зі зменшенням розміру крапель, на яке розбивається паливо, випаровування та згорання прискорюється. Повітря, необхідне для згорання, залежно від типу пальника, може подаватися, як разом із паливом в процесі розпилення так і окремо після початку розпилення. До того ж існують рішення, в яких частина повітря потрапляє в топку разом з паливом, а інша — подається уже в саму топку. У цьому випадку повітря розділяється на первинне (те що йде з паливом) та вторинне.

У разі використання мазуту слід враховувати, що його займання відбувається за температур, вищих  $0^{\circ}\text{C}$ . У разі зменшення цієї температури відбувається помутніння палива з утворенням кристалів льоду та виділенням парафінових вуглеводнів, які забруднюють фільтри та значно збільшують густину. Таке явище зумовлює необхідність встановлення системи підігріву пального.

Мазутні пальники головним чином розподіляються за способом розпилення палива (Baukal Jr, 2012, pp. 309–324):

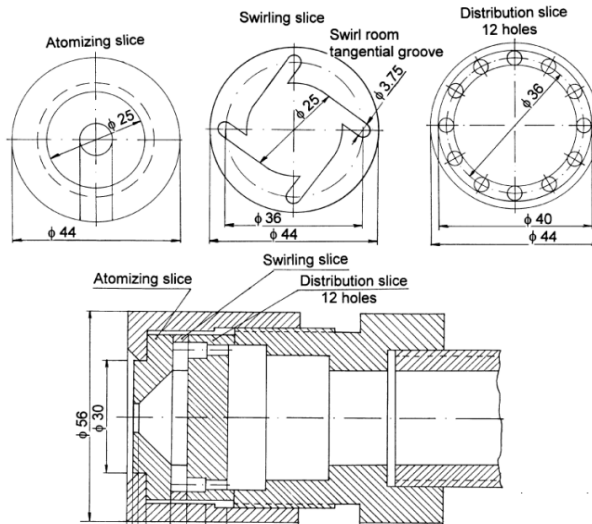
- механічне розпилення;
- розпилення паром або повітрям.

Механічні розпилювачі працюють шляхом подачі дизельного палива під

високим тиском 2 – 7 МПа (Basu et al., 2000, р. 84) залежно від необхідної потужності котла.

Конструкція пальника з механічним розпиленням має розподільну вставку, камеру закручення та розпилювальне сопло (рисунок 1). Конструкція розподільчої вставки передбачає наявність отворів, розташованих ближче до стінок пальника. Проходячи через такі вставки потік розбивається на більш дрібні частини і прямує до камери закручення. У ній пальне закручується, проходячи через спіральні розташовані напрямні, після чого прискорюється через звуження в розпилювальному соплі та потрапляє в топку. Розпилення відбувається завдяки значним відцентровим силам у розігнутому потоці, що виходить із сопла.

Головним недоліком такої конструкції є вузький діапазон регулювання потужності через погіршення розпилення у разі зменшення тиску пального.



**Рисунок 1 – Мазутний пальник з механічним розпиленням**  
(Джерело: Basu et al., 2000, pp. 83–84)

Для розпилення також може застосовуватись швидкий потік газу, який стикається з повільним потоком пального. За таким принципом працюють пальники з паровим або повітряним розпилювальним середовищем (рисунок 2). У сучасних пальниках необхідна витрата розпилювального газу знаходиться в межах 0.02 – 0.1 кг на кілограм пального. Тиск пального на вході достатньо мати в межах 0.2 – 0.25 МПа, за цих умов пар або повітря подається під тиском 0.5 – 0.75 МПа.

У порівнянні з механічними пальниками, розпилення відбувається більш якісно і з'являється можливість регулювати потужність котла в значно більших діапазонах.

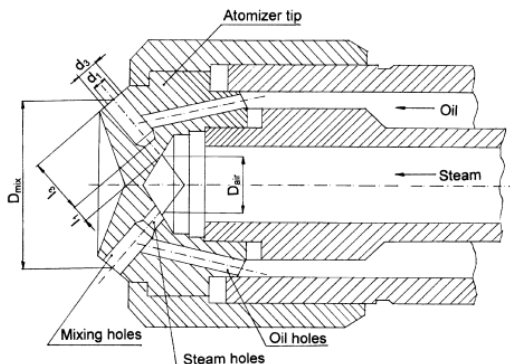
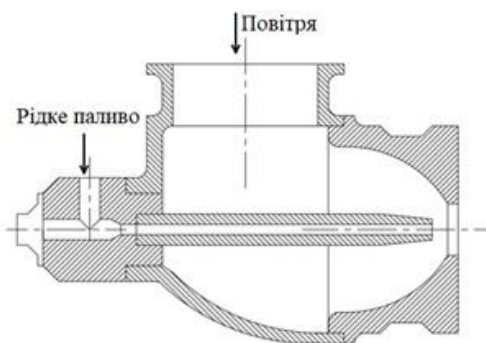


FIGURE 5-7. A Y-type steam oil atomizer

### Рисунок 2 – Мазутний пальник з паровим розпилювальним середовищем (Джерело: Basu et al., 2000, p. 94)

Розпилювачі низького тиску (рисунок 3) дозволяють спростити конструкцію пальника та разом із цим зберегти високу якість розпилення мазуту. Повітряний потік рухається зі швидкістю 70 – 100 м/с під надлишковим тиском 2 – 7 КПа (Basu et al., 2000, p. 102).

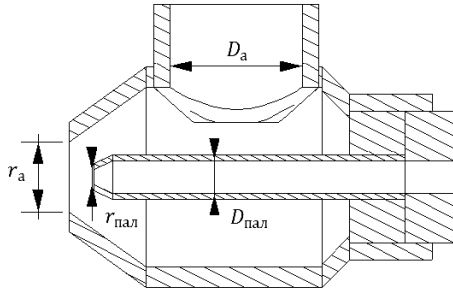
Через нижчий тиск у системі для розпилення, як правило, використовується все необхідне для горіння повітря.



### Рисунок 3 – Мазутний пальник низького тиску (Джерело: Створено авторами)

Із вищезазначених видів пальників найбільш придатним для котла опалення є розпилювач низького тиску завдяки простій конструкції та відносно невисоким значенням тисків повітря й пального на вході. Це в свою чергу робить конструкцію системи простішою та дешевшою. Недолік, яким є мала потужність, порівняно з іншими варіантами пальників, не відіграє суттєвої ролі через те, що котел призначений для нагріву води. Він може бути виконаний без високого питомого тепловиділення в топці.

Для побудови геометрії пальника необхідно знайти діаметри паливної і повітряної магістралі (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Геометричні характеристики дизельного пальника низького тиску (Джерело: Створено авторами)**

Внутрішній діаметр паливної труби  $D_{\text{пал}}$  знаходиться за масовою витратою палива  $G_{\text{пал}}$ :

$$D_{\text{пал}} = \sqrt{(4G_{\text{пал}})(360\pi \cdot \rho_{\text{пал}} \cdot \vartheta_{\text{пал}})}, \text{ м} = 18.8 \sqrt{\frac{G_{\text{пал}}}{\rho_{\text{пал}} \cdot \vartheta_{\text{пал}}}}, \text{ мм} \quad (1)$$

де  $\rho_{\text{пал}}$  – щільність палива  $\text{кг/м}^3$ ;

де  $G_{\text{пал}}$  – масова витрата палива  $\text{кг/год}$ ;

$\vartheta_{\text{пал}}$  – швидкість подачі пального, береться в межах  $0.1\text{--}1$  м/с.

Масова витрата пального знаходиться за значенням теплової потужності пальника.

$$G_{\text{пал}} = \frac{W}{Q}, \text{ кг/с} = 3600 \frac{W}{Q} \text{ кг/год} \quad (2)$$

де  $W$  – тепловіддача пальника,  $\text{кВт}$ ;

де  $Q$  – теплотворність мазуту, яку можна прийняти  $40000$   $\text{кВт/кг}$ ;

Площа зрізу паливного сопла  $A_{\text{пал}}$ :

$$A_{\text{пал}} = 196 \frac{G_{\text{пал}}}{\mu_{\text{пал}} \sqrt{\rho_{\text{пал}} \cdot P_{\text{пал}}}}, \text{ мм}^2 \quad (3)$$

де  $\mu_{\text{пал}}$  – коефіцієнт розширення паливного сопла  $\text{кг/м}^3$ , береться в межах  $0.2\text{--}0.3$ ;  $P_{\text{пал}}$  – тиск палива на вході до сопла, знаходиться в межах  $30\text{--}150$   $\text{кПа}$ .

Внутрішній діаметр на вході до повітряного патрубку  $D_{\text{а}}$ :

$$D_{\text{а}} = 18.8 \sqrt{\frac{G_{\text{а}}}{\rho_{\text{а}} \cdot \vartheta_{\text{а}}}}, \text{ мм} \quad (4)$$

де  $\rho_{\text{а}}$  – щільність повітря  $\text{кг/м}^3$ ;

$G_{\text{а}}$  – масова витрата повітря  $\text{кг/с}$ ;

$\vartheta_{\text{а}}$  – швидкість подачі повітря, береться в межах  $70\text{--}100$  м/с.

Повітря подається з коефіцієнтом надлишку  $\alpha=1.1\text{--}1.15$ , що забезпечує

повноту згорання:

$$G_a = a \cdot 13.5 G_{\text{пал}}, \text{ кг/год} \quad (5)$$

Площа на виході з повітряного сопла  $A_a$ :

$$A_a = 196 \frac{V_a}{\mu_a} \sqrt{\frac{\rho_a}{P_a}}, \text{ мм}^2 \quad (6)$$

де  $\mu_a$  – коефіцієнт розширення повітряного сопла, береться в межах 0.6–0.8;  
 $P_a$  – тиск повітря на вході, знаходиться в межах 2–7 КПа;  
 $V_a$  – об'ємна витрата повітря, м<sup>3</sup>/год.

Довжина полум'я  $L$  в першому наближенні (Pourhoseini, et al., 2021):

$$L = 2 \left( 42 + \frac{60}{V_a} \right) d_a, \text{ м} \quad (7)$$

## Результати

Розрахунок розмірів пальника проведено за формулами 1–6. Потужність топки котла береться рівною 30 кВт, що відповідає значенням для простого настінного котла. В топці котла буде використовуватися лише один пальник:

$$G_{\text{пал}} = 3600 \frac{30}{39000} = 2.7, \text{ кг/год} \quad (8)$$

Швидкість подачі пального  $v_{\text{пал}}$  прийнята 0.25 м/с:

$$D_{\text{пал}} = 18.8 \sqrt{\frac{2.7}{890 \cdot 0.3}} = 2.07, \text{ мм} \quad (9)$$

Тиск пального на вході до сопла  $P_{\text{пал}} = 30$  КПа, коефіцієнт розширення сопла  $\mu_{\text{пал}} = 0.2$ :

$$A_{\text{пал}} = 196 \frac{2.7}{0.2 \sqrt{590 \cdot 30000}} = 0.512, \text{ мм}^2 \quad (10)$$

$$d_{\text{пал}} = \sqrt{\frac{4A_{\text{пал}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.512}{\pi}} = 0.81, \text{ мм} \quad (11)$$

Надлишок повітря  $\alpha = 1.15$ :

$$G_a = 1.15 \cdot 13.5 \cdot 41.9 =, \text{ кг/год} \quad (12)$$

Швидкість подачі повітря 15 м/с:

$$D_a = 18.8 \sqrt{\frac{41.9}{1.22 \cdot 15}} = 28.39, \text{ мм} \quad (13)$$

Тиск повітря на вході до сопла  $P_a = 7$  КПа, коефіцієнт розширення сопла  $\mu_a = 0.6$ :

$$A_a = 196 \frac{41.9 / 1.22}{0.2} \sqrt{\frac{1.22}{7000}} = 147.9, \text{ мм}^2 \quad (14)$$

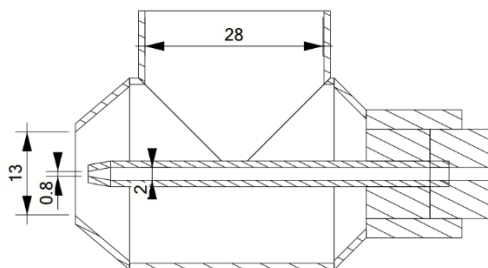
$$d_a = \sqrt{\frac{4A_a}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 147.9}{\pi}} = 13.2, \text{ мм} \quad (15)$$



Довжина факелу полум'я створеного пальником:

$$L = 2 \left( 42 + \frac{60}{41.9/1.22} \right) 0.0137 = 1.2, \text{ м} \quad (16)$$

Отримані розміри використані для створення ескізу пальника (рисунок 5)



**Рисунок 5 – Отримані розміри дизельного пальника  
(Джерело: Створено авторами)**

## Висновки

Були розкриті основи роботи найбільш розповсюджених мазутних пальників — механічних та з розпилювальним середовищем.

На основі пальника з розпилювальним середовищем, як найбільш практичного для створення простих систем опалення, була побудована методика розрахунку його геометричних характеристик та розмірів факелу полум'я, що він утворює. Була продемонстрована послідовність розрахунків.

Отримані результати дають можливість оцінити складність подальшої розробки котла на основі даного пальника.

## Посилання

- Basu, P., Kefa, C., & Jestin, L. (2000). *Boilers and Burners*. In *Mechanical Engineering Series*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1250-8>
- Baukal Jr, C. E. (Ed.). (2012). *The john zink hamworthy combustion handbook: Volume 1-Fundamentals*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/b12975>
- Pourhoseini, S. H., Namvar-Mahboub, M., Hosseini, E., & Alimoradi, A. (2021). A comparative exploration of thermal, radiative and pollutant emission characteristics of oil burner flame using palm oil biodiesel-diesel blend fuel and diesel fuel. *Energy*, 217, 119338. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119338>

# Застосування комп'ютерно-інтегрованих технологій у проектуванні ракетних двигунів

Володимир Сукачевський , Василь Шевцов 

**Purpose.** The purpose of the study is to analyze the accumulated experience in designing rocket engines using computer-integrated technologies, and to identify current areas of development of this issue and tools for solving scientific and practical problems. **Design / Method / Approach.** The study is based on the analysis of the accumulated experience in the design of rocket engines using computer-integrated technologies. The researchers developed a design algorithm, a modeling algorithm, and a mathematical model for calculating the parameters of liquid-propellant rocket engines and solid-propellant rocket engines. The analysis process covers the design stages with the introduction of the latest digital tools. **Findings.** The article identifies key areas for modernizing the rocket engine design process. New methods for modeling and analyzing the design stages using computer-integrated technologies have been developed, which allows to increase the efficiency and accuracy of design. **Theoretical Implications.** The work confirms the importance of using computer-integrated technologies to optimize and improve the rocket engine design process. The theoretical conclusions emphasize the importance of these technologies in ensuring the accuracy and quality of the design of the latest rocket engine models. **Practical Implications.** The results obtained can be used to improve the design process at modern rocket engine development enterprises. This will increase the competitiveness of such companies and their leading positions in the engineering services market. **Originality / Value.** The originality of the study lies in an integrated approach to analyzing the rocket engine design process using the latest computer-integrated technologies. The proposed tools and models are new and have significant value for the further development of the industry. **Research Limitations / Future Research.** The study is limited to the analysis of certain stages of design and the use of individual tools. Further research could focus on expanding the range of digital tools and improving mathematical models for other types of rocket engines **Paper Type.** Practitioner Paper, Review of Methods.

## Keywords:

rocket engine, engine design, computer-integrated technology, design algorithm, modeling algorithm, digital tools, artificial intelligence

## Contributor Details:

Volodymyr Sukachevskiy, PhD Student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [vsukachevskiy@gmail.com](mailto:vsukachevskiy@gmail.com)

Vasyl Shevtsov, Assoc.Prof., Cand.Sc., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [shevtsov@tf.dnu.edu.ua](mailto:shevtsov@tf.dnu.edu.ua)



Ракетні двигуни відіграють ключову роль у ракетно-космічній техніці та виконують широкий спектр задач. Розробка ракетного двигуна є складним та комплексним процесом через велику кількість сполучених вузлів та екстремальні режими роботи, що властиво для ракетної техніки.

Сучасні тенденції розвитку ракетно-космічної техніки (РКТ), на відміну від принципів розробки в минулому, серед головних критеріїв оптимізації мають кінцеву вартість конструкції і, відповідно, вартість запусків. Інженери прагнуть скоротити кількість дорогих експериментів та покращити їх інформативність. За всю історію було спроектовано велику кількість варіантів ракетних двигунів, однак визначення найоптимальнішої схеми на етапі проектування є досить неоднозначною задачею. Саме тому одним із актуальних напрямків розвитку ракетних двигунів є синтез ефективних конструкторсько-технологічних рішень при проектуванні ракетних двигунів з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Ракетний двигун є складною технічною системою і використання ефективних математичних моделей та автоматизованого процесу проектування дозволить спростити процес проектування та аналізу ракетних двигунів. Математичні моделі конструкцій та середовища проектування мають бути гнучкими та універсальними для того щоб покрити усі загальні потреби аналізу та розробки ракетного двигуна будь якої схеми та типу.

## Мета

Метою дослідження є аналіз накопиченого досвіду у проектуванні ракетних двигунів з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій та визначення актуальних напрямків розвитку даного питання, інструментів для вирішення науково-практичних задач.

## Обговорення

Проектування – це використання наукових принципів, технічної інформації і уяви для визначення механічної структури системи, призначеної для виконання заданих функцій з максимальною економічністю та ефективністю. Конструктор приймає участь у розробці на усіх етапах, від концепції до серійного виробництва. Інші спеціалісти вузького профілю виконують окремі задачі. Час, об'єм і послідовність визначає конструктор, виходячи з комплексних вимог до вирішення загальної задачі і врахування кінцевих строків розробки майбутнього виробу. Процес проектування складається з таких етапів:

1. Науково-дослідницькі роботи (НДР);
2. Концептуальний проєкт;
3. Ескізний проєкт (ЕП);
4. Технічний проєкт;
5. Виготовлення;
6. Випробування;

## 7. Експлуатація.

Найбільш трудомісткими є етапи 3 – 4, а найбільш вартісним є етап 6.



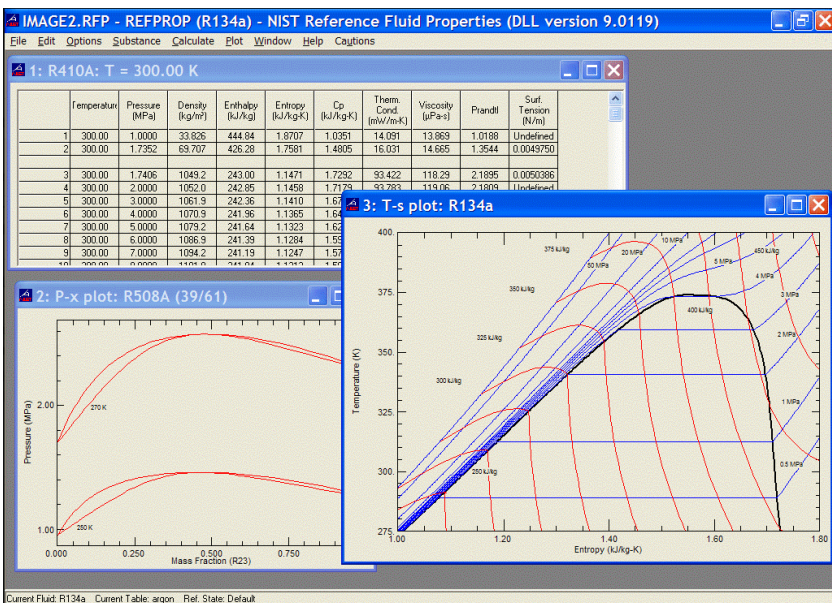
**Рисунок 1 – Алгоритм проєктування ракетних двигунів**  
(Джерело: Створено авторами)

У процесі проведення науково-дослідницьких робіт відбувається процес формування вимог до конструкції. НДР є одним із етапів вирішення науково-практичних задач. Результатом НДР є сформульоване технічне завдання (ТЗ).

Для ефективного проведення подібних робіт необхідно мати накопичену базу даних з інформацією про існуючі конструкції, їх масово-габаритні та енергетичні параметри, експлуатаційні характеристики, застосування, схеми, тощо. Це стосується не лише конструкції ракетного двигуна та його вузлів, але і властивостей компонентів палива та матеріалів, з яких може виготовлятися конструкція, тощо. Накопичення усієї необхідної інформації може відбуватися з відкритих джерел з їх верифікацією, зі спеціалізованої літератури та власного досвіду попередніх розробок. Також можливе використання спеціалізованих продуктів (у нашому випадку – програмного забезпечення). Таке програмне забезпечення може відноситися до автоматизованої системи наукових досліджень (АСНД). До АСНД відносяться середовища обробки і зберігання результатів випробувань от як, наприклад, пакет

«IGOR Pro» (WaveMetrics, 2021).

Аналіз результатів випробувань дозволяє накопичити досвід та використовувати його у майбутньому. Також збір і систематизація матеріалів про конструктивні особливості попередніх розробок дає змогу використовувати відпрацьовані, надійні вузли у нових розробках. Зазвичай більшість такої інформації є захищеною інтелектуальною власністю виробника та у відкритому доступі її не багато. Деяко можна знайти у мережі інтернет, але така інформація не є надійною і потребує узгодження з верифікованим джерелами. Властивості компонентів палива для власної бази даних можна запозичити з програмних пакетів «REFPROP NIST» (NIST, 2013), «RPA» (Ponomarenko, 2024). Точні характеристики матеріалів, що використовуються, зазвичай надаються їх виробником і є прикладом накопичення інформації з власного досвіду.



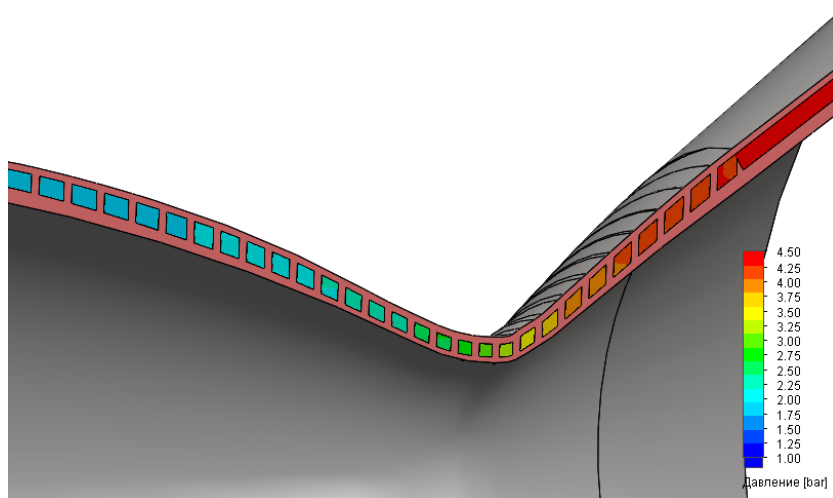
**Рисунок 2 – Термодинамічні та гідродинамічні властивості речовини R134a (Джерело: NIST, 2013)**

Концептуальний проект є конкретизованим продовженням НДР. Виходячи з проаналізованої інформації та досвіду надійних рішень, конструктори мають можливість розробити конструкцію кращу за прототипи чи конкурентні конструкції шляхом впровадження і синтезу ефективних конструкторських рішень.

На етапах 3–4 конструктором визначаються часові рамки та об'єм робіт, їх розподіл компетентним спеціалістам. Відбувається процес реалізації впроваджених конструкторсько-технологічних рішень. Після узгодження

ЕП випускається сам ЕП, конструкторська та експлуатаційна документація. На цих етапах повсюдно використовуються системи автоматизованого проектування і розрахунку (САПР) та системи автоматизованого проектування технологічних процесів (САПР ТП), пакети програм, що дозволяють використовувати математичні операції та інші.

Для проведення необхідних розрахунків використовують реалізацію інженерних методик та чисельних методів у програмних пакетах, наприклад таких як: рішення від «Ansys» (Ansys, Inc, 2024), «SolidWorks Flow Simulation» (Dassault Systèmes SE, 2024), «CEA» (NASA, 2024), «Proper» (Cooper, 2016), «Open Modelica» (Open Source Modelica Consortium (OSMC), 2024), «MATLAB» (The MathWorks & Cleve Moler, 2024) тощо.

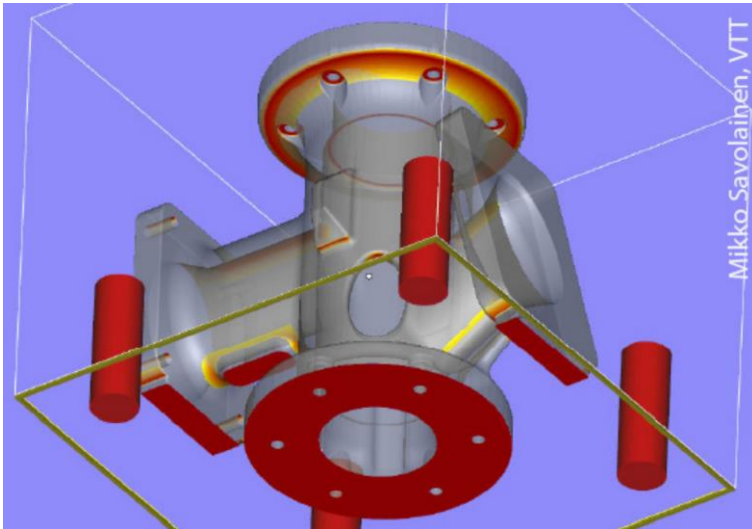


**Рисунок 3 – Результат моделювання сорочки регенеративного охолодження РРД у середовищі SolidWorks Flow Simulation (Джерело: Створено авторами)**

Розробка креслень, тривимірне моделювання для виконання загального складання та попередніх розрахунків за допомогою вищенаведених пакетів програм виконується за допомогою таких програмних пакетів як: «Autodesk Inventor» (Autodesk, Inc, 2024), «SolidWorks» (Dassault Systèmes SE, 2024), «CATIA» (Dassault Systèmes SE, 2024), «Autodesk AutoCAD» (Autodesk, Inc, 2024) та ін.

Спостерігаючи за тенденціями розвитку РКТ можна помітити збільшення ролі адитивного виробництва. Сучасні конструкції мають все більший відсоток вузлів виготовлених за допомогою адитивних технологій. Це логічний крок розвитку РКТ, оскільки використання адитивних технологій дозволяє забезпечити необхідну, раніше не доступну точність виготовлення, з різницею у характеристиках між готовими виробами не більше ніж 4% (Soller at al., 2015, p. 4). До переваг також відноситься покращення масово-габаритних характеристик. Автоматизована система технологічної

підготовки виробництва є незамінним інструментом при виготовленні конструкції 3D друком. До подібних програмних пакетів відносяться «CATIA» (Dassault Systèmes SE, 2024), «Siemens NX CAM» (Siemens AG, 2024) та інші CAM і CAPP системи.



**Рисунок 4 – Результат аналізу кутів підтримки для друку за технологією Laser Powder Bed Fusion середовищі Magics (Джерело: Kokkonen at al., 2016, p. 96)**

Комунікація між спеціалістами є не менш важливим аспектом конструювання. Результат роботи кожного спеціаліста, групи, відділу, сектору має відповідати загальному вектору розробки конструкції. Ефективна комунікація дозволить уникнути помилок та пришвидшити процес розробки виробу. Комунікація та обмін інформацією має бути захищеними. Це дозволить убезпечити інтелектуальну власність та попередити потрапляння розробок у руки небажаних осіб. Використання такого ПЗ як «Autodesk Vault» (Autodesk, Inc., 2024) та аналогічних дозволить задовольнити ці потреби.

Виходячи з перерахованого вище, наступним етапом розвитку ракетно-космічної техніки, який може змінити галузь, є уніфікація різноманітних програмних середовищ, що використовуються в процесі розробки і проектування. Створення єдиного, інтегрованого і всеохоплюючого циклу проектування вузлів є надзвичайно перспективним напрямком. Це дозволить не тільки значно підвищити ефективність роботи інженерів, але й суттєво зменшити потребу у проведенні чисельних фізичних експериментів, які є дуже витратними, як з точки зору часу, так і ресурсів. Завдяки такій уніфікації можна буде оптимізувати всі етапи проектування, починаючи від НДР аж до утилізації. Це не тільки сприятиме скороченню часу на розробку нових моделей, але й забезпечить більш точні і надійні результати, що в кінцевому підсумку підвищить якість та конкурентоспроможність продукції.

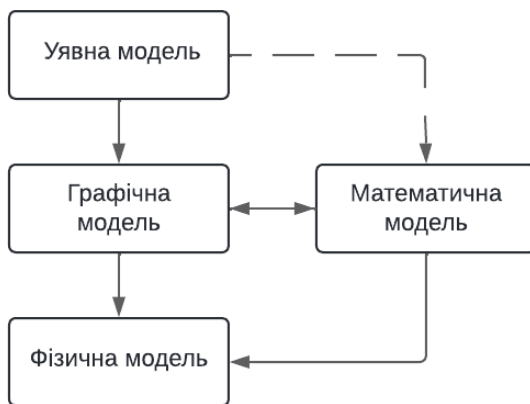


Одним з кроків у цьому напрямку є розробка середовища «CATIA V6» (Dassault Systèmes SE, 2024) з концепцією PLM (Product Lifecycle Management – система керування життєвим циклом виробу). Цей сервіс дозволяє підтримувати спільну діяльність компаній та здійснювати накопичення і обмін інформацією на всіх стадіях життєвого циклу виробу від проектування до зняття з виробництва та на всіх ділянках розширеного підприємства. PLM-підхід охоплює всіх учасників процесу (підрозділи підприємства, його бізнес-партнерів, постачальників і замовників) і дозволяє їм виступати як єдине ціле в діяльності з розробки, проектування, виробництва, експлуатації та технічного обслуговування виробів.

Впровадження подібної системи надасть можливість:

- Створити єдиний архів конструкторської та технологічної документації про продукти.
- Об'єднати усіх учасників розробки та експлуатації виробу.
- Керувати ідеями та концепціями на усіх етапах розробки.
- Об'єктивно оцінювати можливості та ресурси підприємства та ефективніше ними розпоряджатися.
- Забезпечити контроль якості як під час виробництва так і під час експлуатації.

Можливості, які пропонує система PLM тісно переплітається з філософією руху New Space. Окремі диверсифіковані підприємства, що виробляють компоненти РКТ, зможуть більш ефективно співпрацювати один з одним та конкурувати між собою, що в свою чергу приведе до зниження вартості космічних польотів і подоланню «застою» у технічному розвитку РКТ. Збільшення конкурентоспроможності нових підприємств відносно монополістів галузі стане тією самою рушійною силою, що дозволить подолати застій у розвитку РКТ.



**Рисунок 4 – Алгоритм моделювання ракетних двигунів**  
(Джерело: Створено авторами)



Для вирішення майбутніх науково-практичних задач пропонується створити статичну модель РРД. Термодинамічні параметри, такі як ідеальний питомих імпульс, витратний комплекс та інші, які є основою статичної моделі, що пропонується, досить складні у підрахунках. Тому для їх визначення у моделі, що розробляється, буде створено базу даних термодинамічних параметрів продуктів згоряння для основних паливних пар компонентів, що часто використовуються у РРД. Це пропонується виконати з використанням програмного комплексу «RPA» (Ponomarenko, 2024) або подібних. Термодинамічні та гідродинамічні параметри окремих компонентів аналогічним чином визначено за допомогою програмного комплексу «REFPROP NIST» (NIST, 2013). Значення представлятимуть собою багатовимірний масив даних, де шуканий параметр залежить від декількох фізичних величин. Для визначення проміжних значень застосовано багатовимірну лінійну інтерполяцію.

Камера згоряння:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\text{пит.ід}} = I_{\text{пит0}}(km, P_k, T_{\text{о.вх}}, T_{\text{п.вх}}, AR) \\ B_{\text{ід}} = B_{\text{ід0}}(km, P_k, T_{\text{о.вх}}, T_{\text{п.вх}}) \\ G_k \cdot B_{\text{ід}} = P_k \cdot F_{\text{кр}} \\ G_{\text{к.п}} \cdot (km + 1) = G_k \\ G_{\text{к.о}} \cdot (km + 1) = G_k \cdot km \end{array} \right. \quad (1)$$

Газогенератор:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{гг}} = T_{\text{гг0}}(km_{\text{гг}}, P_{\text{гг}}, T_{\text{о.вх.гг}}, T_{\text{п.вх.гг}}) \\ R_{\text{гг}} = R_{\text{гг0}}(km_{\text{гг}}, P_{\text{гг}}, T_{\text{о.вх.гг}}, T_{\text{п.вх.гг}}) \\ k_{\text{гг}} = k_{\text{гг0}}(km_{\text{гг}}) \end{array} \right. \quad (2)$$

Турбіна:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_T = \eta_T \cdot G_T \cdot L_{\text{ад}} \\ L_{\text{ад}} \cdot (k_T - 1) = k_T \cdot R_T \cdot T_{\text{т.вх}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_{\text{т.вих}}}{P_{\text{т.вх}}}\right)^{k_T - 1/k_T}\right) \\ T_{\text{т.вх}} = T_{\text{т.вих}} + \left(\eta_T \cdot \frac{L_{\text{ад}}}{k_T} \cdot \frac{k_T - 1}{R_T}\right) \end{array} \right. \quad (3)$$

Насос:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_H \cdot \eta_H = G_H \cdot \left(\frac{P_{\text{н.вих}} - P_{\text{н.вх}}}{\rho_{\text{комп}}(P_{\text{н.сп}}, T_{\text{н.сп}})}\right) \\ (P_{\text{н.вих}} - P_{\text{н.вх}}) = \frac{(T_{\text{н.вих}} - T_{\text{н.вх}}) \cdot \rho_{\text{комп}}(P_{\text{н.сп}}, T_{\text{н.сп}}) \cdot \eta_H \cdot C_{\text{ркомп}}(P_{\text{н.сп}}, T_{\text{н.сп}})}{(1 - \eta_H)} \end{array} \right. \quad (4)$$

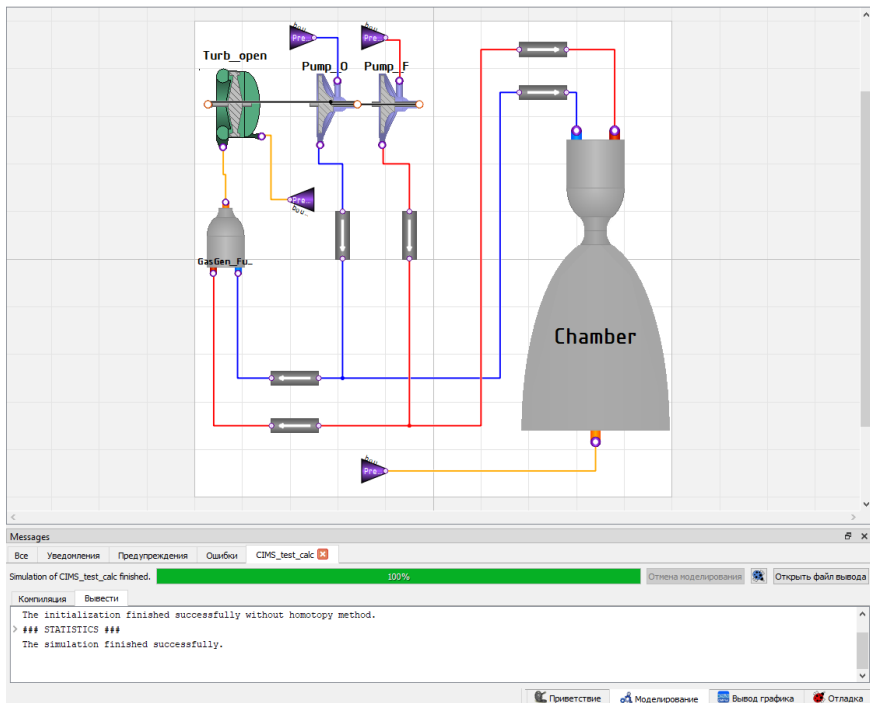
Визначення основних параметрів агрегатів РРД є важливим етапом проєктування систем РРД. Це дозволяє скоротити час на проєктування агрегатів, оскільки це, певною мірою, є ітеративним процесом. Реалізація системи рівнянь можлива у будь якому пакеті програм, що дозволяє використовувати математичні операції. Її використання дозволить проводити попередній аналіз енергетичних параметрів РРД, як складної технічної системи.

Наприклад, однією із важливих задач є аналіз впливу зовнішніх та

внутрішніх факторів на параметри двигуна. Вирішення цієї задачі дозволяє проєктувати системи автоматичного регулювання двигуна. До зовнішніх факторів, які впливають на роботу двигуна, відносяться відхилення від номінальних значень тиску і температури компонентів палива на вході в двигун та відхилення гідравлічної характеристики дроселів. До внутрішніх факторів відносяться відхилення від номінальних значень гідравлічних опорів магистралей, площ критичних перерізів, витратного комплексу і ККД агрегатів.

Подальша модернізація системи рівнянь може розвиватися, наприклад, шляхом застосування парадигм об'єктно-орієнтованого програмування. Через декомпозицію системи рівнянь моделі РРД з'являється можливість створити функціонально незалежні та декларативні компоненти, що описують агрегати РРД. У такому випадку відкривається можливість до композиції компонентів у інтуїтивно зрозумілому порядку, подібно до реального складання конструкції РРД.

На рисунку 5 наведено приклад даної реалізації статичної моделі РРД у середовищі Open Modelica, що засноване на об'єктно-орієнтованій, декларативній, мультидоменній мові Modelica (Open Source Modelica Consortium (OSMC), 2024).

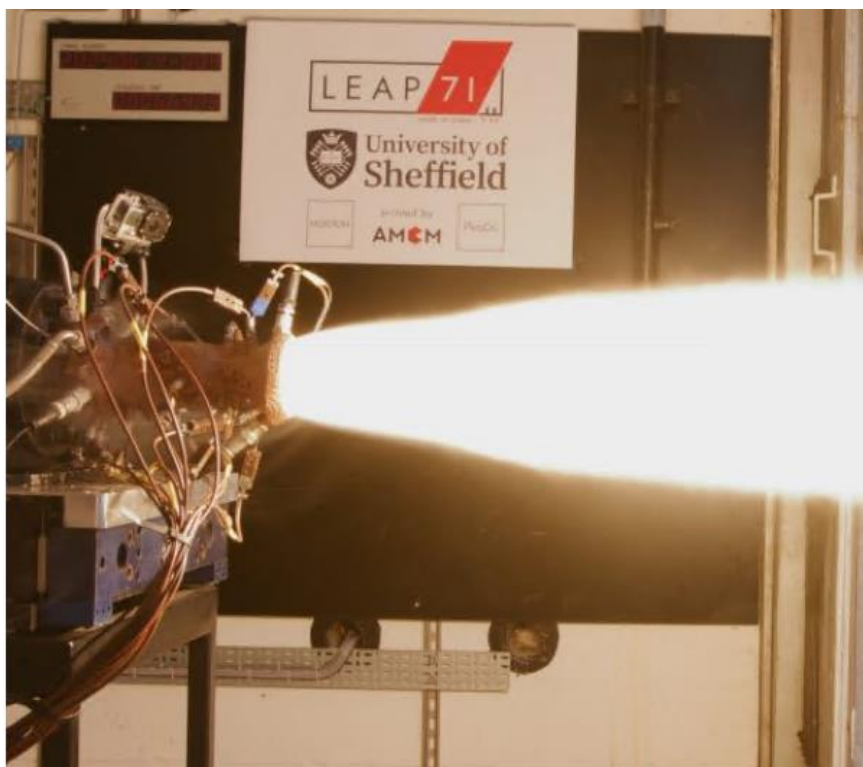


**Рисунок 5 – Спрощене моделювання РРД у середовищі Open Modelica  
(Джерело: Створено авторами)**

Одним із перспективних напрямків модернізації процесу конструювання ракетних двигунів є використання штучного інтелекту (ШІ). Дана технологія знаходиться на етапі свого становлення і знаходить своє застосування у багатьох галузях, включаючи РКТ. Для того щоб включити ШІ у етапи циклу конструювання ракетних двигунів та використовувати його для автоматизації і оптимізації процесів, необхідно спочатку навчити його цьому. Одним підходів у ШІ є машинне навчання, яке ґрунтується на використанні певних обсягів даних та алгоритмів.

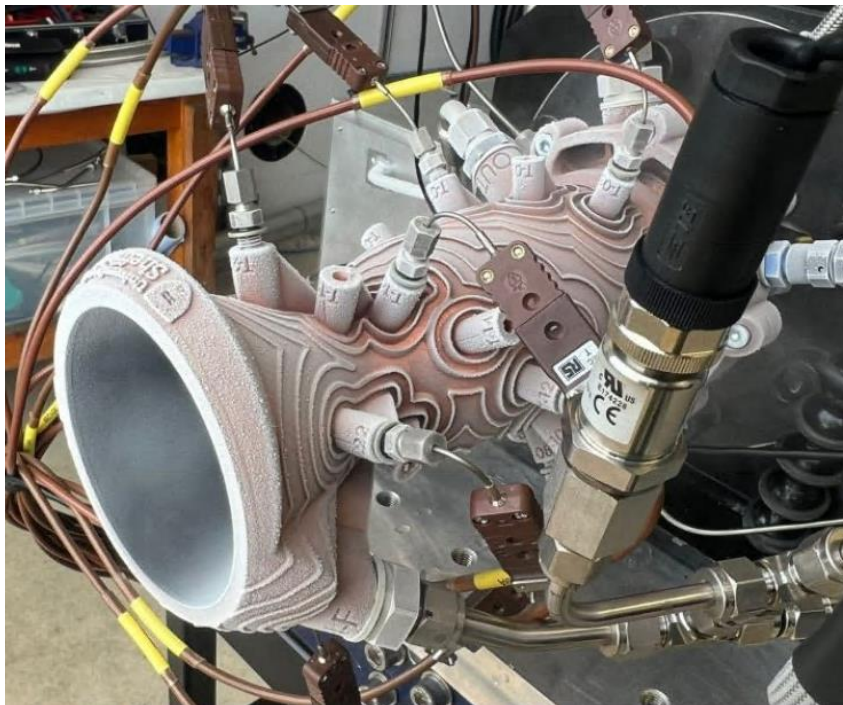
Доступ ШІ до бази даних конструкцій ракетних двигунів, термодинамічних та гідродинамічних властивостей компонентів палива, алгоритмів конструювання, виготовлення та випробування дозволить набагато швидше вирішувати тривіальні задачі, що часто стоять перед інженерами.

Приватна аерокосмічна компанія LEAP71 заявляє, що влітку 2024 року вони з першої спроби провели успішні вогневі випробування РРД тягою 5 кН, що був спроектований та виготовлений фактично без участі людей.



**Рисунок 6 – Вогневі випробування РРД виготовленого за допомогою ШІ (LEAP 71, 2024)**

Процес став можливим завдяки ШІ «Noygon», розробки вищезазначеної компанії. Вказано, що від постановки технічного завдання для ШІ до безпосередньо виготовлення конструкції пройшло менше ніж два тижні. Автоматичне виготовлення конструкції РРД стало можливим завдяки використанню технології адитивного виробництва. Традиційні методи конструювання та виготовлення забезпечували б аналогічний результат протягом багатьох місяців, можливо навіть протягом декількох років. (LEAP 71, 2024)



**Рисунок 7 – РРД виготовлений за допомогою ШІ на стенді (LEAP 71, 2024)**

На цьому прикладі ми можемо бачити, що використання ШІ «Noygon» дозволило замінити використання CAD, CAE, CAM, CAPP систем. Розвиток та впровадження ШІ при конструюванні ракетних двигунів дозволить інженерам сконцентруватися на розробці новітніх технологій та наукових дослідження, оскільки новий інструментарій значно полегшить та прискорить роботу над конструкціями.

Подальший розвиток концепції PLM чи її похідної неможливий без використання ШІ, оскільки на нього можна покласти не тільки задачі конструювання, а і оцінку можливостей та ресурсів підприємства, виготовлення конструкцій та контроль їх якості.

## Висновки

У статті було проаналізовано основні інструменти і методи розробки та проєктування ракетних двигунів та їх вузлів. Розроблена ефективний алгоритм проєктування ракетних двигунів та запропоновано математичну модель для розрахунку основних параметрів РРД.

## Посилання

- Ansys, Inc. (2024). *Ansys | Engineering Simulation Software*. Ansys. <https://www.ansys.com/>
- Autodesk, Inc. (2024). *Autodesk software*. Autodesk. <https://www.autodesk.com/products>
- Cooper, D. (2016). *ProPep 3*. Rimworld. <https://tinyurl.com/76rp28t6>
- Dassault Systèmes SE. (2024). *Dassault Systèmes*. 3ds. <https://www.3ds.com>
- Kokkonen, P., Salonen, L., Virta, J., Hemming, B., Laukkanen, P., Savolainen, M., Komi, E., Junntila, J., Ruusuvoori, K., Varjus, S., Vaajoki, A., Kivi, S., & Welling, J. (2016). *Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report Vol. VTT-R-03160-16 <https://tinyurl.com/y5kwa693>
- LEAP 71. (2024). *LEAP 71 hot-fires 3D-printed liquid-fuel rocket engine designed through Noyron Computational Model*. LEAP 71. <https://tinyurl.com/2ywsc2vu>
- NASA. (2024). *Chemical equilibrium with applications*. Cearun. <https://cearun.grc.nasa.gov/>
- NIST. (2013). *NIST reference fluid thermodynamic and transport properties database (REFPROP)*. NIST. <https://www.nist.gov/srd/refprop>
- Open Source Modelica Consortium (OSMC). (2024). *OpenModelica*. OpenModelica. <https://openmodelica.org/>
- Ponomarenko, A. (2024). *Rocket Propulsion Analysis (RPA)*. RP Software+Engineering UG. <http://software.lpre.de/index.htm>
- Siemens AG. (2024). *Siemens PLM Software*. Siemens. <https://plm.sw.siemens.com/en-US/>
- Soller, S., Beyer, S., Dahlhaus, A., Konrad, A., Kretschmer, J., Rackemann, N., & Zeiss, W. (2015). Development of liquid rocket engine injectors using additive manufacturing. In *6th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS 2015)*. <https://tinyurl.com/53y5hkf5>
- The MathWorks & Cleve Moler. (2024). *MATLAB*. MathWorks - MATLAB & Simulink. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- WaveMetrics. (2021). *Igor Pro®*. Igor Pro by WaveMetrics. <https://www.wavemetrics.com/products/igorpro>

# Scientific and Technical Texts: Translation Aspects in Electrical and Computer Engineering

Irina Suima 

**Purpose.** The purpose of the paper is to study the lexical and grammatical levels of technical documentation in the English and Ukrainian languages, as well as to analyze the means of expression of English technical documentation in the Ukrainian language in the field of electrical engineering and computer technology in order to achieve adequacy. **Design / Method / Approach.** Research methods: theoretical study and analysis of literary sources on the problem of research; methods of linguistic analysis: descriptive and comparative methods, methods of classification and systematization. **Findings.** It has been established that cultural differences have a significant impact on the perception of technical information, which determines the need to carefully consider the context and cultural features of both the source and target audiences, **Theoretical Implications.** As a result of the theoretical analysis, various approaches to the translation of culturally specific information in the scientific-technical text were considered. Translation of technical texts is one of the most responsible types of translation. **Practical Implications.** The practical value of this study is that the obtained results can be taken into account and used for: a) solving current issues of bilingual communication, contributing to ensuring the compliance of scientific and technical terminology with international standards; b) provision of practical recommendations on the translation of technical documentation; c) development of special educational courses that cover the theory and practice of scientific and technical translation, as well as the creation of manuals and dictionaries of technical terminology. **Originality / Value.** The scientific relevance of the study consists in highlighting the methods of translation of scientific and technical terminology, which is constantly updated through productive means of word creation. **Research Limitations / Future Research.** The study can serve as a basis for further studies in this field and improve the methods of translation of scientific and technical vocabulary. **Paper Type.** Practitioner paper.

## Keywords:

technical translation, terminology adaptation, cultural differences, lexical and grammatical analysis, scientific and technical texts, computer technology documentation

## Contributor Details:

Irina Suima, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro national university:  
Dnipro, UA, [irinasuima2017@gmail.com](mailto:irinasuima2017@gmail.com)



Modern English scientific and technical literature are based on the norms of the English language with certain features. In particular: a large number of specialized terms and words of foreign origin are used; a detailed selection of lexical units is carried out for the most accurate expression of thought; special attention is paid to service words that provide a logical connection between individual elements of statements.

Scientific and technical texts refer to the scientific style and are used in the spheres of scientific activity, scientific and technical progress of society, education and training. All of the above-mentioned peculiarities determine the relevance of the research.

When translating scientific and technical literature, it is necessary to take into account that although the language of these texts is part of the national language and uses its lexical and grammatical set of expressions, it also has its own style, corresponding to the purpose and tasks of scientific style. The features of terminology and grammar, characteristic of scientific texts, determine it.

The language of scientific and technical literature is characterized by the use of a large number of terms, various abbreviations, the preference for some syntactic abbreviations over others, the peculiarities of the translation of certain grammatical constructions, the use of ellipsis to express thoughts, etc. One of the key stylistic features of scientific and technical literature is brevity in the presentation of material and clarity of wording.

## **Objective and tasks**

The purpose of the paper is to study the lexical and grammatical levels of technical documentation in the English and Ukrainian languages, as well as to analyze the means of expression of English technical documentation in the Ukrainian language in the field of electrical engineering and computer technology in order to achieve adequacy.

This purpose required solving the following tasks: to analyze functional styles and linguistic means of their expression; to determine the main characteristics and features of scientific and technical texts; to analyze the functional purpose and main classifications of instructional texts; to determine the basic concepts of professional competence of future translators; to define the problems, lexical and grammatical features of scientific and technical terminology; to analyze the translational transformations of scientific and technical terminology from English to Ukrainian; to form recommendations on the translation of scientific and technical terms into Ukrainian.

## **Materials and methods**

Research methods: theoretical study and analysis of literary sources on the problem of research; methods of linguistic analysis: descriptive and comparative methods, methods of classification and systematization. The main method, that is used for the research is the descriptive approach referring to the method of analyzing and documenting languages as they are actually spoken or written by native



speakers, without imposing prescriptive rules or judgments about correctness. Descriptive linguistics focuses on observing and recording the patterns and structures of language, including phonology (sounds), morphology (word formation), syntax (sentence structure), semantics (meaning), and pragmatics (language use in context).

This approach aims to describe languages objectively, without evaluating them based on any external standards or norms. Descriptive linguistics is often contrasted with prescriptive linguistics, which involves prescribing rules and norms for language use based on subjective opinions or social conventions.

As a scientific basis for the analysis of the use of translation tools in the process of translating English-language technical documentation, simple and complex terms, terms-phrases, abbreviations and syntactic structures in the fields of electrical engineering and computer technology were used.

## **Results: lexical peculiarities of scientific and technical texts**

One of the main differences between the language of technical literature and the language of fiction is the high level of use of specialized terms in the text, which are often not even found in terminological dictionaries. With the development of scientific knowledge, the need for new definitions of concepts increases, which leads to the expansion of the vocabulary, the main part of which is defined by new terms. It is important to have deep knowledge of new terminology and to be able to express it accurately in the native language during the translation of scientific and technical literature. This is one of the key challenges in the process of such translation (Al-Abbas & Haider, 2021).

The main requirements for translation include:

1. Accurate reproduction of the content of the original text.
2. Clear expression of ideas in the shortest and most concise form, corresponding to the style of Ukrainian scientific and technical literature. It is important to avoid transferring the specific features of the English language, because the goal is to express ideas in the native language in a modern way, taking into account modern standards.
3. The translation must fully comply with generally accepted norms of the Ukrainian language. When translating, we should take into account the absence of some terms in the Ukrainian language and syntactic structures specific to English. It is also important to pay attention to the peculiarities of the location of semantic accents in sentences: the Ukrainian language is characterized by a strengthening of the semantic content at the end of the sentence, while the English language is characterized by a weakening of the semantic accent at the end. Thus, it is important to consider that the Ukrainian sentence emphasizes the last, while the English sentence determines the main emphasis at the beginning.

The language of scientific and technical literature is characterized by the absence of emotionality, figurative comparisons, metaphors, elements of humor, irony, and other means of expression (Al-Abbas & Haider, 2021).



Although the language of scientific and technical literature is characterized by a large number of special terms, it also includes a significant number of commonly used words and expressions. Polysyllabic words make up a large part of this vocabulary. Sometimes only grammatical features are not enough to accurately determine the meaning of a polysemantic word; it is also necessary to take into account its lexical connections (Hosshanthika, 2022). Thus, the reproduction of the meaning of the verb to suggest depends on whether the subject of the action performs the role of an animate or inanimate object. In the case of an animate one, it can be translated as *пропонувати* or *припускати*:

We suggest a new method of work.

*Ми запропонували новий метод роботи.*

In a situation where the object is inanimate, the appropriate translation of the word is *наводити на думку* or *дозволяти припустити*:

This evidence suggested that the acid was essential.

*Ці дані дозволили припустити, що кислота необхідна.*

In other cases, on the contrary, choosing the correct lexical meaning of a polysemantic word depends on taking into account its grammatical connections. For example, such meanings of the verb to assume, such as accept or acquire, appear when this verb is joined by an addition expressed by a noun:

All deposits of uranium will assume tremendous importance.

*Усі поклади урану набувають величезного значення.*

In the context of assuming or relying, the verb to assume is used in the objective infinitive inflection (in the complex subject), as well as before the object defined by the subordinate clause:

The most common alternating current for lighting is assumed to go through 50 cycles in 1 second.

*Припускається, що для освітлення частіше всього використовується змінний струм 50 періодів за секунду (50 Гц).*

We assume the compressor to be adaptable to any power source.

*Ми припускаємо, що компресор можна пристосувати до будь-якого джерела енергії.*

When translating scientific and technical literature, it is recommended to follow the sequence of work with the text:

1. Familiarize yourself with the text or a separate paragraph, try to understand its general meaning.

2. Consider each complex sentence separately, breaking it into simple parts: complex sentences – into main and subordinate clauses, and complex sentences – into simple sentences.

3. When analyzing complex sentences, where their constituent elements can be immediately identified, it is recommended to find the predicate of the main and subordinate clauses.

4. In each sentence, determine the predicate group, and then find the subject group and the object group.

5. To start translating a sentence, you should define the group of the subject, and then move on to the translation of the group of predicate, object and circumstances.

6. When looking up unknown words in the dictionary, it is recommended to predict their part of speech in a sentence. In this case, one should refrain from choosing the first meaning of the word, and instead familiarize oneself with all the meanings of this part of the language and choose the most appropriate meanings for the context for the translation of the text.

Different approaches can be used when translating scientific and technical literature:

1. Translation based on equivalents available in the Ukrainian language, i.e. stable and appropriate correspondences between the two languages, which, in most cases, do not depend on the context. For example: viscose – *віскоза*; cedar – *кедр*; heating – *нагрів*; loss – *втрата*.

2. The use of analogs in translation, which involves the use of words from the synonymous series. In such situations, one foreign word may have several Ukrainian equivalents, for example: bunching – *групування, варіювання, збирання, накопичення*; allowance – *дозвіл до чого-небудь, допущення*.

It is necessary to choose the option from this series that best fits into the specified context.

3. Calculation or literalness of the translation includes the transmission of an English word or expression by its exact reproduction by means of the Ukrainian language, for example: multistoried – *багатопверховий*; motor convertor – *двигун-перетворювач*; superpowersystem – *надміцна система*; sky-scraper – *хмарочос*.

During the literal translation of the sentence, no rearrangements occur; the sentence structure is preserved, and each word is translated as it appears in the dictionary (taking into account the context). Literal translation is used when most of the English words in the sentence have equivalents in the Ukrainian language, and when the structure of the sentence fully corresponds to the Ukrainian language.

Radio men well know that alternating current is the very current that makes radio possible.

*Радисти добре знають, що змінний струм – це той самий струм, який робить можливим радіозв'язок.*

But it is not always possible to translate literally.

Before the coming of rail way and the steam ship the volume of world trade was very small compared to what it is today.

*До виникнення залізних доріг та парових суден обсяг світової торгівлі порівняно із сучасним обсягом був незначним.*

The literal translation for this sentence is incompatible with the norms of the Ukrainian language, and the word coming cannot be translated by the word *приход* in this sentence. It is recommended to choose one of the possible answers for the word coming. The nouns railway, steamship must be given in the plural, which is more suitable for the Ukrainian language.

However, there are situations when an English word has an analogue in Ukrainian, but the context does not allow using any of the definitions given in the dictionary. In this case, it is necessary to check whether the context gives the sentence an additional nuance that is not found in the words from the dictionary, and

to choose a complete version of the translation that corresponds only to a specific case (Ihnatiuk, 2022).

The verb to telescope in different meanings corresponds to the Ukrainian words with the meaning to fold, to compress, but none of these meanings is suitable for translating the word in a sentence.

Time is a remarkable thing for any measurement, but it telescopes when events come quickly one after another.

*Час – чудова річ для будь-яких вимірювань, але він скорочується, коли події проминають швидко одна за іншою.*

4. For English words that do not have lexical equivalents in the Ukrainian language, a descriptive translation can be used. This involves conveying the meaning of an English word using a more or less common explanatory formulation.

For example:

a) prompt-period accident *можна передати лише описовим перекладом – аварія, пов'язана з переходом реактора до моментально-критичного режиму;*

b) standard performance – *стандартний показник ефективності робітника, який необхідно досягти для виконання завдання за одну годину, визначений для виконання норми.*

Descriptive translation is also used to explain newly created words. When translating words that are not in the dictionary, it is necessary to determine their meaning according to the context, while taking into account the word-forming elements of the given word and the main means of forming new words (Maksymenko et al., 2023).

5. Transliteration is the process of translating Ukrainian writing into English using letters, regardless of the pronunciation of the English word. To use transliteration, you can even not know the pronunciation of an English word, because it is enough to limit yourself to visual perception: retarder – *ретардер*; transposition – *транспозиція*; irradiation – *ірадіація*; maser – *мазер*.

The transposition technique can be used when the concept highlighted in the English text evokes associations that are closely woven into the Ukrainian reader's imagination. In cases where this does not happen, the transliteration should be accompanied by an appropriate note that explains the essence of this concept:

*Airlift – ерліфт (пневмопіднімач); computron – компутрон (багатоелементна лампа для лічильних обладнань).*

However, it is important to remember that when transliterating, the English names are often pronounced differently than in their native language, and the English people may not understand them. Frequent use of transliteration can lead to "pollution" of the Ukrainian language and make it difficult to better understand the essence of the original.

7. Transcription consists in reproducing the pronunciation of an English word using the letters of the Ukrainian alphabet, that is, transferring its phonetic sound.

White spirit – *Уайтспірит*; fan – *фен*; Whitehall – *Уайтхол*.

Transcription is the main method of translating names and titles, which, like transliteration, is used in cases where it is necessary to preserve the brevity and specificity of a foreign word. In cases where these stylistic expressions are not

decisive, it is more appropriate to use a descriptive translation, since transcription creates a new lexical element that can be unpredictable for the reader.

## **Results: grammatical peculiarities of scientific and technical texts**

In addition to lexical conversion, grammatical methods of translating the original text are also widely used. This includes the following grammatical and syntactic transformations: addition, deletion, replacement of parts of speech, replacement of state, change of word order, syntactic assimilation, sentence segmentation, sentence combining, model sentence replacement, model sentence replacement. A grammatical shift in translation occurs when the grammatical structure of the source sentence differs from the structure of the target language, and the linguistic tradition of the target space requires such changes and agreements (Moskaliuk, 2020).

Therefore, we would like to emphasize that when translating into Ukrainian, it is necessary to ensure maximum adaptation to the English text in accordance with all linguistic norms and stylistic features of the Ukrainian language. Thus, the reader can easily and effectively familiarize himself with the text content of the document, analyze them and practically follow these texts. In addition, it should be noted that mainly in order to achieve an adequate translation, the translation is complex and complementary, i.e. in one sentence several translation techniques are used at the same time. Consider the following example:

Do not exceed the maximum water level indicated in the inner pot to prevent overflow.

*Для запобігання переповненню не наливайте води вище максимального рівня, який вказаний у внутрішній каструлі.*

The translator resorted to grammatical substitution – the substitution of a part of speech: the verb to prevent was replaced by the noun prevention. Thirdly, the lexical unit maximum in the Ukrainian version is reproduced using adaptive trans-coding. In addition, the sentence has changed even at the syntactic level due to the observed use of permutations. Therefore, among the transformations of grammar and syntax, the most specific weight is occupied by the replacement of parts of the language and the assimilation of syntax. The frequency of use is accompanied by a change in word order and addition. Substitution of sentences and conjunction of sentences are less often used.

When translating manuals for example for the use of household appliances, we can use the style and approach of technical translation. In order to perform their work effectively, translators must fully understand the source language and the target language, possess basic subject knowledge, and develop in the field of translation studies to acquire the necessary skills and abilities. Note that translation is also open to innovation. Today, technical translation encompasses the application of machine translation systems and translation automation systems. However, such an activity requires not only a lot of energy and time, but also

concentration and thoroughness, as translators will face many problems and difficulties in their work. First of all, it is necessary to remember that the operating texts are characterized by stamps, jargon, various abbreviations, etc. In addition, complications during translation can be factors such as time, deadlines for submission of finished materials or working conditions of the translator. In order to avoid any problematic situations, it is extremely important to know the details of reproduction that are characteristic only of such texts (Novikova & Suima, 2024).

In the course of the study, a transformational analysis was carried out, which revealed the use of lexical, grammatical and syntactic transformations of the translation. When reproducing texts for using household appliances in lexical transformations, tracing paper, texts, antonyms, descriptive translation are most often used. Grammatical transformations include replacement of parts of speech, replacement of status categories, additions. At the syntactic level, translators use more techniques of changing word order, syntactic assimilation, and sentence structure. However, not all explanatory texts have the correct translation, as there are many lexical-grammatical and stylistic errors (Suima, 2024).

During the research, it was determined that grammar and vocabulary in scientific and technical literature have their own unique features that distinguish them from the general language norm. Scientific and technical literature is characterized by the use of specialized terminological apparatus, technical accuracy and objectivity of speech. It is noted that the use of scientific and technical language requires from the author not only deep knowledge in a specific field, but also the ability to clearly and succinctly express his thoughts. The analysis of grammatical structures and lexical means allows us to identify trends in the use of linguistic means in scientific and technical literature and reveal their influence on the understanding of texts.

## Conclusions

It was found that the effective use of grammatical and syntactic transformations in the translation of texts is important for ensuring a high-quality and understandable text. They allow you to adapt the language material to the cultural and linguistic characteristics of the target audience, making it easier to understand the texts. Secondly, the study of various types of grammatical and syntactic transformations, such as addition, deletion, replacement of a part of speech, replacement of state, change of word order, made it possible to determine optimal translation strategies to increase the comprehensibility and accuracy of texts. In general, it can be concluded about the importance of studying and using grammatical and syntactic transformations when translating texts for the use of household appliances as a key element of improving the quality and efficiency of communication in this specific genre of texts.

As a result of the analysis of texts for household appliances, a number of features were revealed that affect the quality and comprehensibility of the translation into Ukrainian. An important part of the work was the definition of strategies and methods that contribute to the high-quality translation of texts. The study

also takes into account the cultural and psychological aspects of translation, balancing technical accuracy and accessibility for different categories of consumers, as they affect the user's perception of information. A balanced consideration of technical accuracy for different categories of consumers is important.

In the second chapter, it is emphasized that the effectiveness of translation tools makes it possible to significantly facilitate the process of adapting technical documentation, however, it is important to emphasize that caution is necessary when using these tools, since technical specificity can lead to inaccuracies and inaccuracies in translation. The study emphasized the importance of understanding the context and specificity of terminology in the fields of electrical engineering and computer technology.

As a result of the conducted research, dealt with the peculiarities of the reproduction of culturally specific information during the translation of technical texts from English to Ukrainian, a number of important aspects that affect the quality and efficiency of the translation were revealed. It has been established that cultural differences have a significant impact on the perception of technical information, which determines the need to carefully consider the context and cultural features of both the source and target audiences, it is emphasized that the effective translation of technical texts requires not only accuracy in the transmission of terminology, but also adaptation its to the cultural context.

## References

- Al-Abbas, L. S., & Haider, A. S. (2021). Using Modern Standard Arabic in subtitling Egyptian comedy movies for the deaf/ hard of hearing. *Cogent Arts & Humanities*, 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311983.2021.1993597>
- Hosshanthika, M. (2022). Translation of scientific text. In *Proceedings of International Conference on Contemporary Management*. <http://repo.lib.jfn.ac.lk/ujrr/handle/123456789/5786>
- Ihnatiuk, O. (2022). Lexical and grammatical peculiarities of scientific-technical texts: current trends. *Modern engineering and innovative technologies*, (21-02), 174-176. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2022-21-02-020>
- Maksymenko, L., Shostak, U., Trebyk, O., Kostyk, Y., & Malynka, Y. (2023). Features of Translating Scientific Texts into English. *World Journal of English Language*, 13(5), 514. <https://doi.org/10.5430/wjel.v13n5p514>
- Moskaliuk, O. V. (2020). Translation of scientific and technical texts and peculiarities of their perception. *Transcarpathian Philological Studies*, 2(14), 103–107. <https://doi.org/10.32782/tps2663-4880/2020.14-2.19>
- Suima, I. (2024). Rocket engineering terminology in the English scientific and technical discourse: a translation aspect. *Вісник науки та освіти*, 5(23). [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2024-5\(23\)-48-61](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2024-5(23)-48-61)
- Suima, I., & Novikova, O. (2024). The use of the Internet resources in teaching listening skills of students IT specialties. *Сучасні дослідження з іноземної філології*, 25, 491–499. <https://doi.org/10.32782/2617-3921.2024.25.491-499>

# Концепція моделі даних конструктивних елементів у прикладній механіці

Олег Юшкевич 

**Purpose.** To create the concept of a model of analytical and mathematical representation of structural elements in the space of quality indicators of steel grades. **Design / Method / Approach.** A theoretical-analytical approach is applied to the creation of a concept for solving the problem of forming a mathematical model of the data structure. **Findings.** Definitions of training sampling in non-traditional classification of structural elements and class of steels in the space of mechanical properties are formulated. The use of the formulated definitions has proved that the task of structuring data to structural elements can be reduced to the search in the derived array of quality indicators, training samples, around which rational mechanical properties can be formed. **Theoretical Implications.** The concept of analytical-theoretical representation of structural elements is a system of views on the creation of a mathematical description in a multidimensional space, in which the coordinate axes correspond to different types of mechanical properties. This allows us to proceed to the development of a mathematical apparatus designed to create a data structure. **Practical Implications.** The presentation of the steel grade assortment in the multidimensional space of service characteristics of structural elements is illustrative. With its help, it is possible to study the relationship and relationship between steel grades and structural elements, as information objects built on sets of quality indicators. **Originality / Value.** The concept proposes an original systematization of the derived information, taking into account the probability of statistical blurring of parameters, which increases the reliability of the comparative analysis of the characteristics of the structural element and the quality indicators of steels. **Research Limitations / Future Research.** The prospect of creating a mathematical apparatus for the quantitative analysis of various grades of steel by all possible characteristics, which can be proposed for the creation of new structural elements, opens up. This will make it possible to create an analytical system of non-traditional ranking and ordering of steel brands, on the basis of which it is possible to choose substitutes for expensive complex-alloyed steels and alloys. **Paper Type.** Conceptual Paper.

## Keywords:

constructive elements, data structures, analytical and mathematical representation, rolled metal, steel grade, statistical characteristics

## Contributor Details:

Oleh Yushkevych, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [e.yushkevich@i.ua](mailto:e.yushkevich@i.ua)



Для потреб машинобудівної промисловості часто виплавають сталі різних марок, рівноцінні за механічними властивостями, але різні за призначенням і собівартістю виробництва. Тому з'являється необхідність розробки моделей, за якими можна об'єднувати марки сталей в групи, далі в цих групах знаходити матеріали, які дуже близькі за властивостями. Таки сталі-двійники можуть бути взаємозамінними для розробки різних конструктивних елементів пристроїв прикладної механіки (Юшкевич & Ігнаткин, 2024). Було вивчено реальну номенклатуру сталей та виконано збір даних про механічні властивості металопрокату на 9 підприємствах України (Алчевський МК, «Запоріжсталь», МЗ ім. Петровського, Єнакіївський МЗ, Дніпровський МК ім. Дзержинського, Криворізький МК, Донецький МЗ, Макіївський МЗ, АТ «Дніпроспецсталь»). Для проведення аналітичного дослідження величезних масивів даних необхідно застосувати різні засоби з інформаційних технологій. Це обумовило створення основи для математичного представлення конструктивних елементів, яке стало базисом проведення таких робіт (Юшкевич & Ігнаткин, 2023):

- виявлення на промислових підприємствах марок сталей, близьких за механічними властивостями, тобто двійників та взаємозамінників;
- об'єднання в нетрадиційні групи та підвищення спеціалізованості класів сталей;
- упорядкування марочного сортаменту металопрокату за різними критеріями.

Крім досягнення цих результатів, запропонований підхід дозволяє вирішувати локальні проблеми, які неминуче виникають на етапі проектування або розробки нових конструктивних елементів і технологічних процесів їх зміцнювальної обробки. Аналіз літературних джерел за останні п'ять років свідчить, що аналітичним дослідженням, щодо розробки принципів математичного представлення марок сталей конструктивних елементів не було приділено належної уваги, тому наукова проблема досі потребує свого логічного вирішення. Одержані в роботі результати є новими, важливими і концептуально-теоретичними, які базуються на обробці даних одержаних з 9 провідних підприємств України, за завданнями провідних міністерств і не є просто цікавістю та представлені в різних наукових звітах з державною реєстрацією. Вищевикладена значимість результатів, як в науковому, так и в практичному контексті показує, що представлена тема відповідає сучасним тенденціям і проблемам машинобудування.

Представлена концепція математичної моделі даних буде сприяти розвитку наукової думки, що до інформаційного-аналітичного опису конструктивних елементів і методів кластерного аналізу в прикладній механіці. Концепція представлення семантичних поять прикладної механіки математичним описом піднімає важливі питання створення елементів штучного інтелекту, що може впливати при розповсюдженні положень цієї роботи та подальших публікацій (Юшкевич & Ігнаткин, 2023; Юшкевич & Ігнаткин, 2024) на суспільне обговорення у відповідь на проблеми аналізу баз даних в галузі машинобудування.



## Теоретичне підґрунтя

Проводились дослідження, спрямовані на визначення сукупності класифікаційних параметрів сталей. За допомогою безлічі фактичних даних, які отримали назву класифікаційних ознак, і спеціально розробленого для вирішення оптимізаційних завдань програмного забезпечення, можна виділити з наявних марок сталі оптимальні об'єкти, які найбільш повно відповідають конкретним умовам експлуатації. Однак ані у вітчизняній, ані в зарубіжній промисловості немає брендів сортментів і нормативно-технічної документації на металургійну продукцію. (Калиновский & Зайцева, 2021), які б дозволяли підбирати замітники складнолегованих сталей. При цьому критерії якості цільового продукту встановлюються існуючими стандартами, типовими технологіями та іншими нормативними документами в допустимих межах. Ймовірно, останнє продиктоване тим, що розробники нормативних документів прагнуть підтримувати технологічний процес, наскільки це можливо, в конкретній обраній зоні роботи. Деякі критерії, в силу своєї фізичної природи, можуть суперечити один одному. Наприклад, підвищення твердості матеріалу може суперечити змінам пластичності, крихкості і т. д. У зв'язку з цим постає завдання ранжирування за важливістю критеріїв якості... Задачу можна вирішити за допомогою фрактального формалізму (Volchuk, 2017). Проте, аналітичне математичне представлення дозволяє розв'язати не тільки задачу ранжування, а й визначити сукупність зв'язків між об'єктами інформаційного моделювання — марками сталей і конструктивними елементами. Марки сталі можуть бути об'єднані за рівнями близькості механічних властивостей в фіксовані набори, а саме, нетрадиційні класи, в межах яких може бути проведений порівняльний аналіз, в тому числі за допомогою ранжування. Таким чином, із вихідного набору даних створюється нова структурована інформація про марки сталей, яка дозволяє виконувати операції уніфікації металевих матеріалів відносно заданого конструктивного елемента.

## Практичне значення результатів

Результатом структурування інформації можна вважати впорядкування марок сталей для: економії легуючих елементів; зниження енерговитрат на тону продукції за рахунок раціоналізації як попередньої, так і остаточної термічної обробки; підвищення надійності конструкції при збереженні рівня витрат на її виробництво; зниження собівартості конструктивних елементів при збереженні ступеня службових характеристик відповідно до вимог нормативно-технічної документації.

## Наукова новизна результатів

«Багато складних процесів та явищ у природі складно описати із застосуванням традиційних методик. Реалізувати детермінований спосіб, який

застосовується для оцінювання механічних властивостей масивних металевих виробів, що заснований на аналізі причинно-наслідкових зв'язків, — складне сучасне завдання. Це пояснюється тим, що технологія виробництва складний багатопараметричний процес» (Volchuk et al., 2023). Концепція математичної моделі структури даних дає нову систему поглядів на створення аналітичного опису в багатовимірному просторі, в якому осі координат відповідають різним типам характеристик конструктивних елементів. Представлення марочного сортаменту сталей, як інформаційних об'єктів, в частому випадку, в тривимірному просторі головніших службових характеристик конструктивних елементів є наочним і відомим. Уперше багатовимірність допомагає дослідити відношення і взаємозв'язки між марками сталей і конструктивними елементами, як інформаційними об'єктами множин з урахуванням всіх можливих показників якості.

Концепція теоретико-аналітично представлення конструктивних елементів в багатовимірному просторі механічних властивостей вперше дозволяє перейти до розробки математичної моделі структури даних, яка застосовує алгоритми визначення сукупності зв'язків між об'єктами інформаційного моделювання — марками сталей і конструктивними елементами, і веде до створення системи методів та алгоритмів нетрадиційної кластеризації конструктивних матеріалів. Концепція пропонує нову оригінальну систематизацію вихідної інформації з урахуванням ймовірнісних параметрів, що підвищує достовірність порівняльного аналізу характеристик конструктивного елемента і показників якості сталі. Це, насамперед, дає можливість зі статистичним фактичним розмиттям границь інформаційних об'єктів (за рахунок дійсної інформації одержаної з лабораторій механічних випробувань різних підприємств) зробити експертний підбір групи марок сталей для виготовлення конструктивного елемента, також в ракетно-космічній галузі.

## Мета та завдання

Створити концепцію моделі аналітично-математичного представлення конструктивних елементів в просторі показників якості марочного сортаменту сталей, призначених для їх виробництва.

Завдання дослідження можна звести до розробки концепцій моделі представленої описом:

- 1) вибору навчаючих представників з обраних класів (сукупностей) сталей з будь-яких конкретних показників,
- 2) або ж виділення навчаючих вибірок серед марок сталей після оцінки за критеріями з усіх порівнюваних характеристик.

## Методологія

Метод дослідження базується на ясному і чіткому розгляді етапів об'єктивного процесу семантичного опису структури даних, який був проведений при обробці механічних властивостей одержаних з 9 підприємств. При цьому застосовано теоретико-аналітичний підхід до створення

концепції розв'язання задачі формування математичної моделі даних залежно від вимог до конструктивних елементів. Такий актуальний метод адекватно відповідає меті створення концепції моделі аналітично-математичного представлення конструктивних елементів у просторі показників якості. Одержання концепції моделі — це є досягнення наукового результату. Семантично-математичний опис моделі може бути адаптований для аналогічних дослідів технологічних процесів виготовлення деталей машин. Описаний нижче метод деталізовано дає розуміння процесу одержання концепції моделі даних конструктивних елементів.

## Матеріали та методи

Відібрані характеристики сталей для металовиробів узагальнювали у вигляді таблиць, які мають наступну структуру колонок: марка сталі; завод-виробник; профіль перерізу металопродукату; типорозміри; характерний розмір;  $\sigma_B$ ;  $\sigma_T$ ;  $\delta$ ;  $\psi$ ; КСУ;  $Z_{\text{екв}}$ ;  $\sigma_B / \sigma_T$ ;  $\delta / \sigma_B$ . Таким чином, було отримано генеральну сукупність показників сталей.

Дані з таблиць вводили в комп'ютер і зберігали в текстових файлах, які конвертували в середовище обробки інформації. Попередній аналіз даних виконували в інтегрованому середовищі розробки експертних систем Інтер-Експерт (GURU), що поєднує системи електронних таблиць, СУБД, внутрішню алгоритмічну мову програмування високого рівня, мову запитів SQL та середовище створення інтелектуальних правил, що дає явні переваги перед традиційними системами обробки інформації. Дослідження виконали для сталей (Юшкевич & Ігнаткин, 2023):

1) вуглецевих звичайної якості (СтЗкп, СтЗпс, СтЗсп, СтЗГпс, СтЗпс, СтЗсп та ін);

2) якісних вуглецевих (10, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50);

3) легованих (20X, 35X, 45X, 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 14Г2, 19Г2, 50Г, 10ХСНД, 15ХСНД, 10ХНДП, 14Г2АФ, 15Г2А та ін.).

Після визначення початкових граничних вимог для механічних властивостей конструктивних елементів відповідно до нормативних документів формується масив даних. При цьому можуть використовуватися бази даних фактичних і нормативних характеристик марок сталей по кожному конструктивному елементу. Спільне використання стандартних із нормативної документації, експериментальних вибраних зі звітів за науково-дослідними роботами і фактичних, визначених у промислових лабораторіях при поточному виробництві механічних характеристик сталей, дозволяє виявити показники якості, які функціонально не залежать один від одного. Після цього необхідно систематизувати вихідну інформацію з урахуванням статистичних параметрів і створити основу моделі структури даних конструктивних елементів, в тому числі у вигляді математичних матриць і електронних таблиць. Це підвищує достовірність роботи моделі порівняльного аналізу показників якості і дає можливість розробити алгоритм підбору раціональної марки сталі для виготовлення конструктивного елемента.

## Можливість реплікації дослідження

Методи і методологія аналітичного дослідження описані достатньо повно, на їх основі можна повторити аналіз даних в різних галузях знань. Текстові дані дають наочне представлення про створення основних положень концепції, що дає доступність іншим дослідникам до її застосування. Викладені процеси збирання й оброки інформації визначають прозорість формулювання концепції. Повний опис системи поглядів на створення математичної моделі даних включає всі ключові деталі, які дозволяють іншим авторам застосовувати представлені методи к аналогічним або новим випадкам.

## Обговорення та результати

На структуру та властивості багатьох матеріалів впливають методики їх отримання, режими оброблення, фазовий і хімічний склад тощо (Hlushkova et al., 2023). Побудову математичної моделі структури даних конструктивних елементів необхідно починати з представлення їх в просторі показників якості конструкційних матеріалів, у тому числі, в вигляді інформаційних об'єктів. Марка сталі як інформаційний об'єкт (Юшкевич. & Ігнаткин, 2024) може бути представлена системою позначень.

$$T_v M_{mfcptn} \quad (1)$$

з цього випливає, що сталь заданого хімічного складу можна позначити аналогічно

$$T_v S_m(X_s)_{fcptn}, \quad (2)$$

ознаки марки сталі (Юшкевич & Ігнаткин, 2023) позначаються послідовністю індексів

$$\{vmfncptns\}, \quad (3)$$

сталь марки  $m$  має набір механічних властивостей (Юшкевич & Ігнаткин, 2024), які є координатами інформаційного об'єкту в просторі показників якості конструкційних матеріалів

$$\{\sigma_{vmfncptns}^1, \sigma_{vmfncptns}^2, \dots, \sigma_{vmfncptns}^i, \dots, \sigma_{vmfncptns}^\rho\}, \quad (4)$$

де  $\sigma_{vmfncptns}^i$  – позначення механічних властивостей -  $\sigma$  сталі -  $m$  з номером-індексом -  $i$ ,  $\rho$  - кількість показників або означеної сукупності індексів ( $i = \overline{1; \rho}$ ).

## Причому

$$\sigma^1 = \sigma_B, \sigma^2 = \sigma_T, \sigma^3 = \delta_s, \sigma^4 = \psi, \sigma^5 = \text{КСУ}, \dots \quad (5)$$

де  $T$  – префікс обробки, призначеної згідно з ДСТУ, ТУ або за іншими нормативними документами для сталі;  $\nu$  – індекс виду обробки: термічної – 1, зміцнювальної – 2 або розміцнювальної – 3 і т. ін.;  $M$  – позначення марок сталей відповідних до ДСТУ, ТУ або інших нормативних документів;  $S$  – позначення сталей в необробленому стані;  $m$  – індекс (умовний порядковий номер) марки сталі;  $f$  – умовний індекс підприємства;  $c$  – індекс стану металу: литий, холоднодеформований, гаряче-деформований;  $p$  – індекс геометричного профілю елемента конструкції;  $t$  – індекс розміру профіля, якому також відповідає величина площі поперечного перерізу металевого виробу;  $n$  – індекс цільового призначення;  $X_s$  – вектор фактичного хімічного складу;  $s$  – індекс плавильного хімічного складу сталі, що ставиться у відповідність номеру в журналі лабораторних випробувань підприємства-виробника або в сертифікаті якості на металопroduкцію. Таким чином, інформаційними об'єктами простору ознак конструктивних елементів виступають сталі, представлені в багатовимірній системі координат механічних властивостей. У нормативно-технічній документації зазвичай представлені масивні списки фізико-механічних властивостей, які не враховують фактичний статистичний розкид їх значень, що виникає при виробництві металопродукату з численних видів марок сталей. У формалізованому описі конструктивних елементів може використовуватися одна основна споживча властивість, сукупність характеристик, інтегральний показник якості або безрозмірні ознаки.

Найчастіше для характеристики конструктивних елементів використовується один з споживчих показників, який умовно вважається основним або головним серед усього набору. Такий підхід може робити представлення про металовиріб неповним. Однак можуть існувати певні важливі показники конструктивних елементів, в мінімальній кількості, за найбільш повною відповідальністю критеріям працездатність. Ці показники повинні бути обґрунтовано підібрані з різноманіття наявних характеристик металевого виробу, що містяться в нормативно-технічній документації.

Використання даних нормативних документів в завданнях ранжирування, упорядкування, структурування, групування, класифікації, заміни, уніфікації, моделювання, оптимізації і сертифікації марок сталей значно ускладнює обробку і представлення досліджуваних характеристик, практично не відображає взаємозв'язок між ними. При цьому виключається визначення функціонально залежних характеристик.

Застосування баз даних отриманих із підприємств вирішує поставлені завдання визначення переліку марок сталей, які мають фактичні значення рівнів фізико-механічних властивостей конструктивного елемента. При цьому, чим більша кількість підприємств, на яких зібрано технічні дані про марки сталі і конструктивні елементи, тим обґрунтованішим та достовірнішим буде результат їх математичної обробки.

Для порівняння однотипних механічних властивостей різних марок сталей використовується комбінаторний метод. Це призводить до великого обсягу порівнянь. Тому для набору сталей, пропонованих для виготовлення конструктивного елемента, можна визначити навчальні вибірки і правила введення в них. При цьому в навчальних вибірках має бути максимальна щільність розташування марок сталей.

### Визначення 1

Навчальна вибірка при нетрадиційній класифікації конструктивних елементів — це сукупність марок, яка утворює клас в ознаковому просторі, та у який набори механічних властивостей спрямовуються к значенням координат центра тяжіння множини

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{v1fcptns}^1, \dots, \sigma_{v1fcptns}^i, \dots, \sigma_{v1fcptns}^p \\ \sigma_{v2fcptns}^1, \dots, \sigma_{v2fcptns}^i, \dots, \sigma_{v2fcptns}^p \\ \dots \\ \sigma_{vmfcptns}^1, \dots, \sigma_{vmfcptns}^i, \dots, \sigma_{vmfcptns}^p \\ \dots \\ \sigma_{2vmfcptns}^1, \dots, \sigma_{2vmfcptns}^i, \dots, \sigma_{2vmfcptns}^p \end{array} \right\} \rightarrow \{ \sigma_{vufcptns}^1, \dots, \sigma_{vufcptns}^p \} \quad (6)$$

де  $\{ \sigma_{vmfcptns}^1, \sigma_{vmfcptns}^2, \dots, \sigma_{vmfcptns}^i, \dots, \sigma_{vmfcptns}^p \}$  — координати точки — марки сталі с індексом-номером  $m$ ;  $\{ \sigma_{vufcptns}^1, \sigma_{vufcptns}^2, \dots, \sigma_{vufcptns}^i, \dots, \sigma_{vufcptns}^p \}$  — координати центра ваги класу в просторі ознак;  $M$  — номер останньої марки в списку;  $\alpha$  — індекс центру ваги.

### Визначення 2

Клас сталей конструктивного елемента в просторі механічних властивостей являє собою статистичну хмару точок, кожна з яких характеризує сталь, зосереджену навколо її центру статистичної ваги в межах заданих відхилень, таких як середньоквадратичний корінь, довірчий інтервал і ін. Найкращим значенням стандартного відхилення  $\delta$  від центру класу при нормальному розподілі механічних властивостей розглянутих сталей слід вважати величину  $\delta = 1,0 \pm 0,2$ .

Використовуючи обмежену початкову відому множену марок сталей (хоча б з однієї), які застосовуються на різних підприємствах для виготовлення конструктивного елемента, можна виконати варіантний поділ всієї генеральної сукупності марок на класи сформовані навколо навчаючої вибірки з попередньо заданими рівнями механічних властивостей і максимальною щільністю розташування точок-сталей всередині них. Через те, що для кожного класу може бути вибрано кілька близько розташованих навчаючих інформаційних об'єктів, то для навчаючої вибірки необхідно виділити мінімальну кількість сталей. Таким чином, використовуючи сформульовані

визначення, задачу структуризації матеріалів конструктивних елементів можна привести до пошуку в вихідному масиві даних, навчаючих вибірок, формуючих навколо себе раціональні механічні властивості які відповідають кращим представникам серед марок з утворених класів сталей.

Механічні властивості є основними показниками якості металевих виробів, і мають стохастичний характер, що визначається діапазоном варіації внаслідок різних способів виробництва і коливань хімічного складу в різних плавках. Тому показники якості конструкційних матеріалів і конструктивних елементів виготовлених з них мають статистичний розкид. Таким чином, значенням механічних властивостей сталей притаманний імовірнісний характер, що згідно з усталеною традицією, не береться до уваги виробниками і споживачами конструктивних елементів. В результаті це призводить до того, що інтервали зміни фактичних механічних властивостей багатьох марок сталей перекриваються, це веде до того, що запаси міцності елементів конструкції використовуються не в повній мірі, їх вартість зростає за рахунок виробництва легованих сталей з близькими значеннями механічних властивостей, попит на металопродукат падає, а конкурентоспроможність металопродукції знижується. Застосування параметрів статистичного розкиду характеристик дозволить, математично описати вірогідність споживчих переваг конструктивних елементів, у тому числі утворені сукупностями різниць механічних властивостей двох різних сталей. Таким чином, одержано концепцію моделі даних конструктивних елементів, основні положення, якої представлені в висновках.

## **Висновки**

1. Запропоновано аналітично-математичний підхід до створення структури даних конструктивних елементів.

2. Структура даних конструктивних елементів - це різновид аналітичного математичного опису, що характеризує розташування об'єктів у багатовимірному просторі ознак.

3. Інформаційними об'єктами простору ознак конструктивних елементів виступають сталі, представлені в багатовимірній системі координат механічних властивостей.

4. Модель даних конструктивних елементів повинна включати характеристики статистичного розкиду реальних механічних властивостей марок сталей, що дозволить вирішити проблеми порівняння конструкційних матеріалів, котрі виникають при відсутності обліку даних, які знаходяться за межами вимог нормативних документів.

5. Аналітична математична модель представлення марочного сортаменту сталей в просторі механічних властивостей конструктивних елементів може теоретично описати взаємозв'язки між марками сталей і конструктивними елементами з урахуванням всіх можливих характеристик.

## Майбутні дослідження

Відкривається перспектива створення математичного апарату кількісного аналізу різних марок сталей за всіма можливими характеристиками, які можуть бути запропоновані для створення нових конструктивних елементів. Це дозволить побудувати аналітичну систему ранжування і впорядкування марок сталей, на основі якої можна вибирати замітники дорогим складнолегованим сталям, що надасть можливості:

- економії легуючих елементів;
- зниження енерговитрат на тунну продукції;
- підбору матеріалів із підвищеною надійністю за збереження рівня витрат;
- зменшення собівартості конструктивних елементів за незмінності рівня експлуатаційних характеристик.

## Посилання

- Hlushkova, D., Bagrov, V., & Volchuk, V. (2023). Application of modern fractal formalism methods for researching the influence of ion-plasma coatings on assessing the wear resistance of volume hydraulic drive components. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 1(103), 34. <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2023.103.1.34>
- Volchuk, V. M. (2017). On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, 39(7), 949–957. <https://doi.org/10.15407/mfint.39.07.0949>
- Volchuk, V. M., Kashyna, N. V., Kotov, M. A., Haidar, A. M., & Kashyn, D. O. (2023). Calculation of material quality criteria using fractal theory. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 2 (101), 20–28. <https://doi.org/10.30838/j.pmhtml.2413.040723.20.980>
- Калиновский, С. К., & Зайцева, Т. А. (2021). К вопросу о влиянии электромагнитных полей на формирование структуры и свойств материалов в процессе термической обработки. In *Молоді вчені 2021 – від теорії до практики* (pp. 57–60). НМетАУ. <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/15983>
- Юшкевич, О., & Ігнаткін, В. (2023). Обґрунтування аналітичного представлення марок сталей для конструктивних елементів в прикладній механіці. *Challenges and Issues of Modern Science*, 1, 165-175. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/32>
- Юшкевич, О., & Ігнаткін, В. (2024). Інформаційно-математичне представлення марок сталей конструктивних елементів в прикладній механіці. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 159-164. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/173>



# Вплив швидкості охолодження на фазовий склад та властивості багатокомпонентних сплавів AlCoCrFeNiV з додаванням Mn та Si

Олександр Кушнеров , Валерій Башев ,  
Сергій Рябцев 

**Purpose.** This paper is devoted to the study of the mechanical properties and structure of multicomponent high-entropy alloys of the AlCoCrFeNiV system with the addition of Mn and Si in as-cast and splat-quenched state. **Design / Method / Approach.** The as-cast ingots of AlCoCrFeMnNiSiV multicomponent samples were prepared using a Tamman furnace under an argon atmosphere. The alloy films were fabricated using the well-known splat-quenching technique. The cooling rate, estimated based on the film thickness, was  $\sim 10^6$  K/s. **Findings.** It has been established that the as-cast alloys have a multiphase structure, which includes solid solutions with a BCC lattice and ordered solid solutions of the B2 structural type, whereas the rapidly quenched alloys contain only disordered BCC solid solutions. It has been shown that the increase in the level of microstresses and dislocation density during rapid solidification contributes to the improvement of the mechanical properties of the studied alloys. The enhanced strength characteristics are due to the significant distortion of the crystal lattice caused by differences in the atomic radii of the elements. **Theoretical Implications.** This study advances the theoretical understanding of high-entropy alloys by explaining the relationship between cooling rates and the resulting phase structures and mechanical properties. **Practical Implications.** With an increase in cooling rate, the dislocation density, level of microstrains and microhardness of the AlCoCrFeMnNiSiV multicomponent alloys increase. **Originality / Value.** This study provides novel insights into the phase composition and mechanical properties of multicomponent alloys with varying cooling rates. The research highlights the distinct structural differences between as-cast and splat-quenched alloys. **Research Limitations / Future Research.** The current study is limited by the scope of cooling rates and alloy compositions investigated. Future research could explore a broader range of cooling rates and additional alloying elements, to further understand their effects on the phase composition and properties of high-entropy alloys. **Paper Type.** Applied Research.

## Keywords:

multicomponent high-entropy alloy, structure, microhardness, splat quenching

## Contributor Details:

Oleksandr Kushnerov, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [kushnrn@gmail.com](mailto:kushnrn@gmail.com)

Valerii Bashev, Dr.Sc., Prof., Dniprovsky State Technical University: Kamianske, UA, [bashev\\_vf@ukr.net](mailto:bashev_vf@ukr.net)

Serhii Ryabtsev, Dr.Sc., Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [siryabts@gmail.com](mailto:siryabts@gmail.com)



Останніми роками у галузі металургії з'явився інноваційний напрямок – розробка багатокомпонентних високоентропійних сплавів (ВЕС). На відміну від традиційної методики, згідно з якою сплави створюються на основі одного-двох головних елементів з додаванням незначної кількості інших для покращення властивостей, ВЕС пропонують принципово новий підхід. ВЕС - це сплави, що складаються з п'яти і більше основних елементів (зазвичай від 5 до 13) у приблизно рівних атомних пропорціях. Ключова особливість цих матеріалів полягає у стабілізації фази твердого розчину завдяки значно вищій конфігураційній ентропії змішування порівняно зі звичайними сплавами. Конфігураційна ентропія змішування під час формування сплаву регулярного розчину визначається за формулою:

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i, \quad (1)$$

де  $c_i$  - атомна частка  $i$ -го компонента, а  $R$  - універсальна газова стала. Підвищення ентропії змішування призводить до зниження вільної енергії Гіббса сплаву, що, в свою чергу, підвищує стабільність твердого розчину. Максимальна ентропія змішування досягається, коли всі компоненти присутні в рівних атомних частках. Такий підхід до створення сплавів відкриває нові можливості для розробки матеріалів з унікальними властивостями, які важко або неможливо досягти традиційними методами. ВЕС можуть демонструвати підвищену міцність, твердість, зносостійкість, корозійну стійкість та інші покращені характеристики (Miracle & Senkov, 2017; Brechtl & Liaw, 2021; Zhou et al., 2023; Firstov et al., 2023; Girzhon et al., 2023; Karpov, 2024; Singh et al., 2024). Дослідження в галузі ВЕС продовжуються, обіцяючи революційні зміни в матеріалознавстві та інженерії матеріалів.

У ВЕС значення ентропії змішування зазвичай коливається в межах 12-19 Дж/(моль·К). Завдяки високій ентропії змішування у структурі ВЕС повинні бути присутні лише прості тверді розчини з кристалічними структурами типу ГЦК або ОЦК. Однак, більш пізні дослідження показали, що від складу сплаву та концентрацій його компонентів, у структурі ВЕС також можуть утворюватися крихіткі інтерметалічні сполуки, складні мікроструктури та навіть аморфні фази, що іноді буває корисним для поліпшення експлуатаційних характеристик сплавів. Для опису ВЕС окрім ентропії змішування  $\Delta S_{mix}$  були запропоновані також інші термодинамічні та розмірні параметри, які можна використати для прогнозування фазового складу ВЕС. До таких параметрів відносять: ентальпію змішування  $\Delta H_{mix}$ , топологічний параметр  $\delta$ , що характеризує різницю у атомних радіусах компонентів сплаву, термодинамічний параметр  $\Omega$  та концентрацію валентних (s+d) електронів у розрахунку на один атом (valence electron concentration, VEC). Методику визначення цих параметрів наведено у (Miracle & Senkov, 2017; Brechtl & Liaw, 2021; Zhou et al., 2023).

Одним з найефективніших способів покращення властивостей металевих матеріалів є швидке гартування. Цей метод базується на надшвидкому охолодженні розплаву (зі швидкістю, що перевищує  $10^4$  К/с), що дозволяє отримувати широкий спектру метастабільних структурних станів у сплавах. Серед них особливо цікавими є нанокристалічні та аморфні стани, які

характеризуються винятковим поєднанням властивостей (Kushnerov et.al., 2021,2023). Завдяки цьому, швидке гартування розглядається як перспективний підхід до створення ВЕС з покращеними характеристиками (Brechtl & Liaw, 2021; Zhou et.al., 2023; Bashev et.al, 2023; .Polonskyu et.al, 2024).

## Мета

Дана робота присвячена дослідженню впливу швидкості охолодження та елементного складу на мікротвердість, фазовий склад та параметри тонкої структури ВЕС системи AlCoCrFeMnNiSiV. Досліджені сплави містили Mn та Si у низьких концентраціях як другорядні елементи для покращення фізичних властивостей сплавів.

## Матеріали та методи

Литі зразки ВЕС системи AlCoCrFeMnNiSiV із номінальними хімічними складами наведеними у табл 1. були отримані за допомогою лабораторної печі Таммана із використанням мідної виливної (швидкість охолодження  $\sim 10^2$  К/с). Для забезпечення однорідності зразки переплавлялися щонайменше тричі. Після цього частина зразків використовувалася для виробництва загартованих з рідкого стану (ЗРС) плівок методом splat-охолодження (splat-quenching). Цей метод полягає в розмазуванні краплі розплаву, яка вистрілювалася струменем інертного газу (аргону) під високим тиском, по внутрішній поверхні мідного циліндра, що обертався з високою швидкістю ( $\sim 8000$  об/хв). Швидкість охолодження оцінювалася за формулою  $V = \frac{\alpha\theta}{c\rho\delta^2}$ , де  $c$  – теплоємність плівки,  $\rho$  – густина матеріалу,  $\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\theta$  – надлишкова температура, а  $\delta$  – товщина плівки (Bashev et.al, 2023; .Polonskyu et.al, 2024). Оскільки товщина отриманих плівок становила  $\sim 40$  мкм, розрахункова швидкість охолодження була близько  $10^6$  К/с. Рентгенофазовий аналіз зразків і плівок проводився на дифрактометрі ДРОН-2.0 з використанням монокроматизованого Cu K $\alpha$  випромінювання. Мікротвердість вимірювалася на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні 100г.

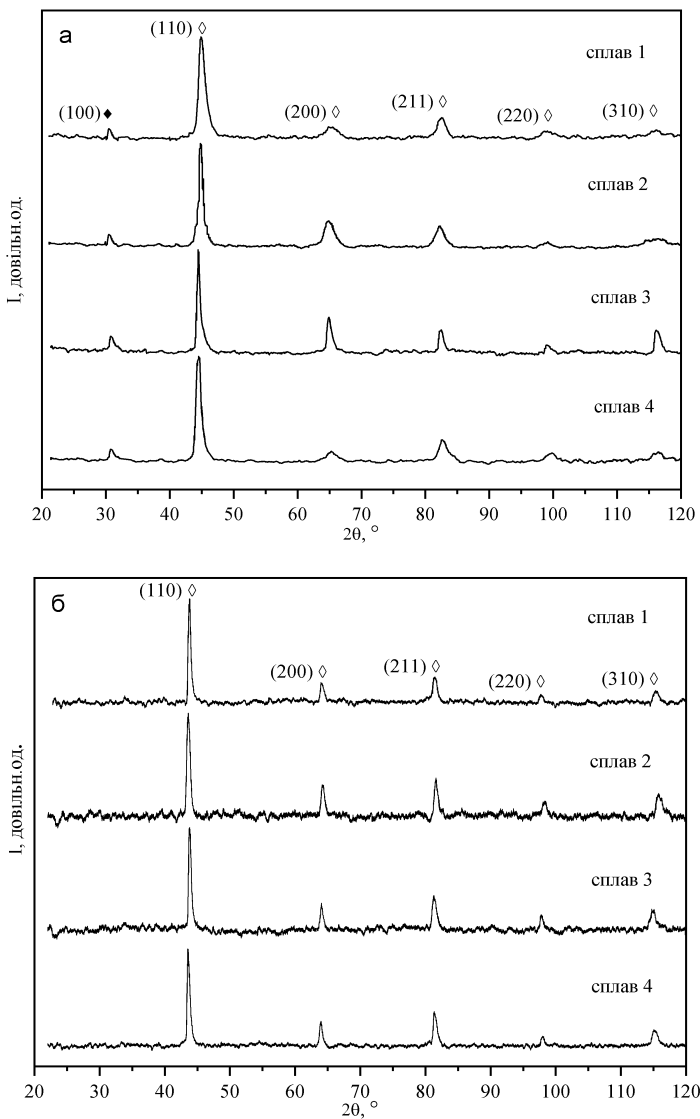
**Таблиця 1 – Номінальні хімічні складі багатоконпонентних сплавів системи AlCoCrFeMnNiSiV (ат.%) (Джерело: розроблено авторами)**

Номер сплаву	Al	Co	Cr	Fe	Ni	Mn	Si	V
1	16,66	16,66	16,66	14,5	16,66	0,5	1,66	16,66
2	14,29	14,29	14,29	26,71	14,29	0,43	1,43	14,29
3	28,57	14,29	14,29	12,43	14,29	0,43	1,43	14,29
4	25	12,5	12,5	23,37	12,5	0,38	1,25	12,5

## Результати та їх обговорення

Із використанням даних табл.1 та даних з (Takeuchi & Inoue, 2005; Miracle & Senkov, 2017) були обчислені значення параметрів  $\Delta S_{mix}$ ,  $\Delta H_{mix}$ ,

$\delta$ ,  $\Omega$  та VEC (табл.2). За дифрактограмами (рис 1) було визначено фазовий склад досліджених сплавів, параметри кристалічної решітки та тонкої структури (області когерентного розсіювання  $L$  та мікронапруження  $\Delta a/a$ ) (табл.3). Густина дислокацій  $\rho$  було визначено за дифракційним піком (110).



**Рисунок 1 – Дифрактограми литих (а) та ЗРС (б) зразків досліджених сплавів (Джерело: Створено авторами)**

**Таблиця 2 – Значення параметрів  $\Delta S_{mix}$ ,  $\Delta H_{mix}$ ,  $\delta$ ,  $\Omega$  та VEC для сплавів системи AlCoCrFeMnNiSiV (Джерело: розроблено авторами)**

Номер сплаву	$\Delta S_{mix}$	$\Delta H_{mix}$	$\delta$	$\Omega$	VEC
1	15,52	-17,04	5,18	1,6	6,76
2	15,18	-14,6	4,96	1,84	6,94
3	15,07	-18,98	5,78	1,3	6,22
4	14,97	-16,81	5,66	1,48	6,45

**Таблиця 3 – Фазовий склад, параметри тонкої структури ( $L$ ,  $\Delta a/a$ ,  $\rho$ ) та мікротвердість ( $H_\mu$ ) досліджених сплавів (Джерело: розроблено авторами)**

Сплав	Фазовий склад	$L$ , нм	$\Delta a/a$	$H_\mu$ , МПа	$\rho$ , см <sup>-2</sup>
Сплав 1 литий	ОЦК + В2 ( $a=0,2888$ нм)	20±2	$3,2 \cdot 10^{-3}$	6800±300	$1,6 \cdot 10^{12}$
Сплав 1 ЗРС	ОЦК ( $a=0,2882$ нм)	34±2	$3,8 \cdot 10^{-3}$	6900±300	$2,6 \cdot 10^{12}$
Сплав 2 литий	ОЦК + В2 ( $a=0,2882$ нм)	30±2	$2,5 \cdot 10^{-3}$	4800±200	$6,3 \cdot 10^{11}$
Сплав 2 ЗРС	ОЦК ( $a=0,2879$ нм)	25±2	$2,8 \cdot 10^{-3}$	6200±300	$6,8 \cdot 10^{11}$
Сплав 3 литий	ОЦК + В2 ( $a=0,2888$ нм)	35±2	$1,6 \cdot 10^{-3}$	6500±300	$4,6 \cdot 10^{11}$
Сплав 3 ЗРС	ОЦК ( $a=0,2887$ нм)	33±2	$1,8 \cdot 10^{-3}$	7500±300	$5,4 \cdot 10^{11}$
Сплав 4 литий	ОЦК + В2 ( $a=0,2886$ нм)	37±2	$1,5 \cdot 10^{-3}$	4600±200	$4,6 \cdot 10^{11}$
Сплав 4 ЗРС	ОЦК ( $a=0,2881$ нм)	33±2	$1,7 \cdot 10^{-3}$	5600±200	$5,7 \cdot 10^{11}$

Аналіз дифрактограм дозволив встановити, що досліджувані ВЕС у литому стані мають двофазну структуру у якій присутні неупорядкований твердий розчин ОЦК та впорядкований твердий розчин із структурним типом В2 (CsCl). Це легко пояснити, аналізуючи значення параметрів наведених у табл. 2. У (Miracle & Senkov, 2017; Dufanets et.al., 2020; Brechtl & Liaw, 2021; Zhou et.al., 2023) стверджується, що у структурі ВЕС з параметрами  $\Omega \geq 1,1$  та  $\delta \leq 6,6$  % формуються тверді розчини заміщення (прості та впорядковані) замість складних інтерметалічних сполук та аморфних фаз. Автори робот [20; 21] прогнозують утворення неупорядкованих твердих розчинів за умови, що ентальпія змішування знаходиться в межах від  $-15$  до  $5$  кДж/моль, а  $\delta$  не перевищує  $4,6$  %. Тип кристалічної решітки твердих розчинів, що утворюються у ВЕС пов'язаний з концентрацією валентних електронів (VEC). У (Miracle & Senkov, 2017; Brechtl & Liaw, 2021; Zhou et.al., 2023) стверджується, що при  $VEC > 8$  формується твердий розчин зі структурою ГЦК, при  $VEC < 6,87$  – ОЦК, а в діапазоні  $6,87 < VEC < 8$  очікується утворення двофазної структури із твердих розчинів типу ОЦК та ГЦК. Натомість, дослідження (Krapivka et.al., 2015; Gorban et.al., 2022, 2023) пропонують дещо інші співвідношення: формування структури ГЦК прогнозується при  $VEC > 8,2$ , ОЦК – при  $4,25 < VEC < 7,2$ , а двофазної структури (ОЦК + ГЦК) – у інтервалі  $7,2 < VEC < 8,2$ .

З табл.2 видно, що ентальпія змішування  $\Delta H_{mix}$  для усіх досліджених сплавів має досить великі від'ємні значення, що сприяє утворенню впорядкованих твердих розчинів. Низьке значення VEC сприяє утворенню фази ОЦК. Ці фактори разом призводять до утворення суміші фаз ОЦК і В2 (впорядкована версія ОЦК). Винятком є сплав 2, для якого значення VEC

знаходиться в діапазоні, де за даними (Miracle & Senkov, 2017; Brechtl & Liaw, 2021; Zhou et al., 2023) переважно спостерігається суміш твердих розчинів ГЦК + ОЦК. Але, якщо виходити із критеріїв, наведених у (Кравічка et al., 2015), усі досліджені сплави мають являти собою прості тверді розчини із решіткою ОЦК.

Тим часом дифрактограми ЗРС плівок досліджених сплавів не мають надструктурного максимуму (100) характерного для впорядкованої фази B2, і, отже, ЗРС плівки містять лише неупорядковану ОЦК фазу. На нашу думку, висока швидкість охолодження при формуванні тонкої плівки повинна перешкоджати появі структур і фаз, характерних для більш рівноважних станів, що утворюються у литих зразках.

Значення параметрів решітки досліджуваних сплавів свідчать про те, що тверді розчини вочевидь утворюються на основі решітки Cr ( $a = 0,2884$  nm), з огляду на вищу температуру плавлення цього металу.

Високі показники мікротвердості ВЕС системи AlCoCrFeMnNiSiV можна пояснити наявністю у кристалічній решітці атомів елементів з різними розмірами, електронною структурою і термодинамічними властивостями. Це призводить до значного викривлення ( $\Delta/a$ ) кристалічної решітки. В результаті підвищується твердість сплавів. Як видно з табл. 3, мікротвердість ЗРС сплавів вища, ніж у литих сплавів. Цей результат не є несподіваним, оскільки мікроструктура та фазовий склад литого сплаву після розпаду перебувають у більш рівноважному багатофазному стані, тоді як ЗРС сплави мають вищий рівень мікродеформацій та густини дислокацій.

## Висновки

На підставі дослідження ВЕС системи AlCoCrFeMnNiSiV у литому та загартованому з рідини стані, можна зробити наступні висновки:

1. Литі сплави мають багатофазну структуру ОЦК + B2, в той час як ЗРС плівки складаються з неупорядкованих твердих розчинів ОЦК. Таким чином підвищена швидкість охолодження запобігає утворенню у складі досліджених ВЕС фаз впорядкованого твердого розчину.

2. Зі збільшенням швидкості охолодження рівень мікродеформацій, щільність дислокацій і мікротвердість багатокомпонентних сплавів системи AlCoCrFeMnNiSiV зростає.

3. Підтверджено провідну роль елемента з вищою температурою плавлення як основи утворення твердого розчину в досліджуваних сплавах.

## Посилання

- Bashev, V. F., Kushnerov, O. I., & Ryabtsev, S. I. (2023). Structure and properties of CoCrFeNiMnBe high-entropy alloy films obtained by melt quenching. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 765(1), 145–153. <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2215125>
- Brechtl, J., & Liaw, P. K. (2021). *High-Entropy Materials: Theory, Experiments, and Applications*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77641-1>

- Dufanets, M., Sklyarchuk, V., Plevachuk, Y., Kulyk, Y., & Mudry, S. (2020). The Structural and Thermodynamic Analysis of Phase Formation Processes in Equiatomic AlCoCuFeNiCr High-Entropy Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(11), 7321–7327. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05250-6>
- Firstov, G. S., Koval, Y. M., Filatova, V. S., Odnosum, V. V., Gerstein, G., & Maier, H. J. (2023). Development of high-entropy shape-memory alloys: structure and properties. *Progress in Physics of Metals*, 24(4), 819–837. <https://doi.org/10.15407/UFM.24.04.819>
- Girzhon, V., Yemelianchenko, V., & Smolyakov, O. (2023). High entropy coating from AlCoCrCuFeNi alloy, obtained by laser alloying. *Acta Metallurgica Slovaca*, 29(1), 44–49. <https://doi.org/10.36547/ams.29.1.1710>
- Gorban, V. F., Firstov, S. O., Krapivka, M. O., Samelyuk, A. V., & Kurylenko, D. V. (2022). Influence of Various Factors on the Properties of Solid-Soluble High-Entropy Alloys Based on BCC and FCC Phases. *Materials Science*, 58(1), 135–140. <https://doi.org/10.1007/S11003-022-00641-7>
- Gorban, V. F., Firstov, S. A., & Krapivka, M. O. (2023). The Influence of Different Factors on Physicomechanical Properties of High Entropy Alloys with fcc Lattice. *Materials Science*, 59(2), 145–151. <https://doi.org/10.1007/S11003-024-00755-0>
- Karpov, S. (2024). Application of high-entropy alloys in hydrogen storage technology. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2024(2), 48–61. <https://doi.org/10.46813/2024-150-048>
- Krapivka, N. A., Firstov, S. A., Karpets, M. V., Myslivchenko, A. N., & Gorban', V. F. (2015). Features of phase and structure formation in high-entropy alloys of the AlCrFeCoNiCu x system (x = 0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0). *The Physics of Metals and Metallography*, 116(5), 467–474. <https://doi.org/10.1134/S0031918X15030084>
- Kushnerov, O. I., Bashev, V. F., & Ryabtsev, S. I. (2021). Structure and Properties of Nanostructured Metallic Glass of the Fe–B–Co–Nb–Ni–Si High-Entropy Alloy System. *Springer Proceedings in Physics*, 246, 557–567. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51905-6\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51905-6_38)
- Kushnerov, O. I., Ryabtsev, S. I., & Bashev, V. F. (2023). Metastable states and physical properties of Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloy thin films. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 750(1), 135–143. <https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2073043>
- Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- Polonsky, V. A., Kushnerov, O. I., Bashev, V. F., & Ryabtsev, S. I. (2024). The influence of the cooling rate on the structure and corrosion properties of the multicomponent high-entropy alloy CoCrFeMnNiBe. *Physics and Chemistry of Solid State*, 25(3), 506–512. <https://doi.org/10.15330/pcss.25.3.506-512>
- Singh, A., Kumari, P., Sahoo, S. K., & Shahi, R. R. (2024). Studies on hydrogen storage properties of TiVFeNi, (TiVFeNi)<sub>95</sub>Zr<sub>5</sub> and (TiVFeNi)<sub>90</sub>Zr<sub>10</sub> high entropy alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.064>
- Takeuchi, A., & Inoue, A. (2005). Classification of Bulk Metallic Glasses by Atomic Size Difference, Heat of Mixing and Period of Constituent Elements and Its Application to Characterization of the Main Alloying Element. *Materials Transactions*, 46(12), 2817–2829. <https://doi.org/10.2320/matertrans.46.2817>
- Zhou, Y., Xiang, H., & Dai, F.-Z. (2023). *High-Entropy Materials* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527837205>

# Розробка автоматизованої системи управління температурним режимом випікання хлібобулочних виробів із використанням нечіткого контролера

Олексій Разживін , Анастасія Люта ,  
Олександр Сімкін , Артем Заліатов 

**Purpose.** The purpose of the work is to improve the main indicator of the economic efficiency of the production of bakery products - the saving of electricity for heating inside the baking chamber. **Design / Method / Approach.** Achieving the goal in the work is carried out by eliminating the possibility of supplying excess heat from heaters by modernizing the automated baking temperature control system. A mathematical model of the automated control system for the temperature mode of baking in a tunnel-type bakery oven was developed using the methods of designing intelligent control systems. The technological process is controlled using a fuzzy controller. **Findings.** Control of the parameters of the internal environment in the cameras was achieved by automated control of actuators. Conducting the technological process from start to finish without operator intervention provides the possibility of remote change of baking modes without stopping the process. Control algorithms for the technological process of baking bakery products have been developed, which exclude incorrect operations. **Theoretical Implications.** According to the results of theoretical research on the mathematical model of the fuzzy control system of the technological process of the production of bakery products, surfaces of the fuzzy control of the technological process of baking by capacity and humidity were obtained. **Practical Implications.** The proposed automated system for controlling the temperature mode of baking bakery products, the operation of the heater and humidifier is adjusted by a fuzzy controller. **Originality / Value.** The simulation results show that the use of fuzzy controllers in automatic control systems allows controlling temperature and humidity at the stages of bread baking. **Research Limitations / Future Research.** The fuzzy controller proposed in the article can control the power of the heater in three positions, the humidity level in three levels, and the baking stage in 3 stages. **Paper Type.** Practitioner Paper.

## Keywords:

automated control system, baking temperature control, fuzzy controller

## Contributor Details:

Oleksii Razzhivin, Cand.Sc., Assoc.Prof., Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC: Zaporizhzhia, UA, [aleksey.razzhivin@mipolytech.edu](mailto:aleksey.razzhivin@mipolytech.edu)

Anastasija Liuta, Cand.Sc., Assoc.Prof., Donbass State Engineering Academy: Kramatorsk, UA, [asyalyutaya@gmail.com](mailto:asyalyutaya@gmail.com)

Oleksandr Simkin, Cand.Sc., Prof., Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC: Zaporizhzhia, UA, [a.i.simkin@mipolytech.edu](mailto:a.i.simkin@mipolytech.edu)

Artem Zaliatov, Ass.Sc., Donbass State Engineering Academy: Kramatorsk, UA, [artem.zaliatov@gmail.com](mailto:artem.zaliatov@gmail.com)





Найскладнішою і відповідальною операцією приготування хліба є випічка. Випічка – це процес прогріву тістових заготовок, що приводить до їх перетворення зі стану тіста в стан хліба. Для випічки хліба і хлібних виробів зазвичай застосовуються печі, в яких тепло, що випікає з тіста хліб, передається термічним випромінюванням і конвекцією при температурі тепловіддаючих поверхонь 300–400 °С і середовища пекарної камери 200–250 °С. Найоптимальнішим варіантом автоматизації процесу випічки є автоматичне регулювання вологості в зоні парового зволоження печі, температур випікання. Однак створення такої системи регулювання є складним через недосконалість приладів вимірювання вологості і температури випікання.

Неточності підтримки температурного режиму та вологості всередині печі часто призводять до зниження якості виробів і до перевитрати електроенергії. Такі відхилення від параметрів технологічного процесу ведуть до підвищення собівартості готової хлібобулочної продукції, тому вирішення даного завдання є актуальною науково-технічною задачею.

В даному проекті спроектовано схему автоматичного регулювання тривалості випічки з корекцією за температурою в другій зоні пекарної камери, де відбувається випічка м'якушки. Застосування такої схеми автоматизації повинно привести до покращення якості продукції, що випікається, і зменшення браку.

Об'єктом дослідження є технологічний процес випічки хлібобулочних виробів в конвекційній печі з електричним підігрівом.

Предмет дослідження. Зниження енергоємності роботи хлібопекарної печі шляхом автоматизації процесу керування з використанням математичних методів, алгоритмів, інформаційного та програмного забезпечення.

## **Цілі та завдання**

Ціллю дослідження є поліпшення основних показників економічної ефективності виробництва – економія електроенергії на підігрів всередині камери за рахунок виключення можливості підведення зайвої кількості тепла від ТЕНів шляхом модернізації автоматизованої системи управління температурним режимом випікання.

Для випікання хліба та хлібних виробів зазвичай застосовуються печі, в яких тепло тісту-хлібу передається термовипромінюванням та конвекцією при температурі тепловіддаючих поверхонь 300–400 °С та середовища пекарної камери 200–250 °С. Найоптимальнішим варіантом автоматизації процесу випічки є автоматичне регулювання вологості в зоні парозволоження печі, температур кірки та м'якушу продукції.

Основним завданням спроектованої автоматизованої системи управління тунельної хлібопекарської печі є:

- Регулювання температури у кожній камері випічки з використанням ТЕНів.
- Регулювання температури гарячого повітря, яка відбирається з печі шляхом зміни частоти обертання електродвигуна.

## Дослідження системи керування процесом випікання хліба

Випікання борошняних виробів у печах є комплексним процесом значного ступеня складності. Для його вивчення доцільно розглядати випікання виробів у печі як сукупність кількох теплових процесів. Значний внесок у розвиток знань щодо процесів, що відбуваються в тісті-хлібі, зроблено вченими Прилепа Н. (Прилепа & Томаля, 2023), Волух М. Д. (Волух & Мешков, 2020). Серед праць у англomовному сегменті наукової літератури можна відзначити авторів Kambourova, V. (Zheleva & Kambourova, 2005), Mistry, H. (Mistry et al., 2006), Altamirano-Fortoul, R. (Altamirano-Fortoul, 2012).

Іншим процесом, який наразі також достатньо вивчений, є тепломасообмін між тістом-хлібом і середовищем пекарної камери печі. У ході численних досліджень був отриманий масив даних щодо впливу та оптимальних значень температури, вологості, відносної швидкості середовища пекарної камери та теплового потоку, що сприймається відкритою та контактною поверхнями виробів упродовж процесу випікання при різних режимах теплообміну (радіаційний, конвективний, мікрохвильовий та їх комбінації).

Автоматизоване регулювання режиму випікання хлібобулочних виробів у хлібопекарських печах будь-яких конструкцій здійснюється відповідною зміною температури та тривалості випікання. В даному випадку однією з основних обставин, що впливають на динаміку теплових процесів у печі, є розсіювання тепла зсередини печі назовні через її стіни. Використання точного математичного опису даного процесу з урахуванням диференціальних рівнянь теплопровідності є складним у реальних системах автоматичного управління температурою. Тому в роботі для «ідеального» випадку плоскої тришарової стіни запропоновано чисельну математичну модель динаміки зміни температури.

На першому етапі для створення і дослідження системи керування процесом випікання хлібу необхідно отримати лінійні математичні моделі процесу. Хлібопекарську піч представлено як багатопараметричний одноємнісний об'єкт, який характеризується рядом технологічних і теплотехнічних величин. Виділено дві ємності: перша – ємність топки, друга – ємність камери випікання печі. Проведено аналітичний розрахунок статичних і динамічних характеристик для ємності топки. В усталеному режимі робота топки описується наступним рівнянням теплового балансу:

$$Q_T - Q_C = 0, \quad (1)$$

де  $Q_T$  – потужність теплового потоку, що надходить до топки, кВт;  $Q_C$  – потужність теплового потоку, що виходить з топки, кВт.

В свою чергу:

$$Q_T = Q_x + Q_\phi + Q_n + Q_{\text{рец}}, \quad (2)$$

де  $Q_x$  – потужність теплового потоку, що надходить до топки за рахунок хімічної теплоти палива, кВт;  $Q_\phi$  – потужність теплового потоку, що надходить

до топки за рахунок фізичної теплоти палива, кВт;  $Q_{\text{п}}$  – потужність теплового потоку, що надходить до топки з повітрям, кВт;  $Q_{\text{реци}}$  – потужність теплового потоку, що надходить до топки з рециркуляційними газами, кВт.

Вхідними величинами для рівняння топки є: витрата палива  $G_{\text{т}}$ , що подається до топки; витрата газів рециркуляції  $G_{\text{реци}}$ , що надходять до топки, і температура газів рециркуляції  $\theta_{\text{реци}}$ . Вихідною величиною, тобто регулюючим параметром даної ділянки, є температура димових газів  $\theta_{\text{д}}$ .

Рівняння динаміки для топки можна отримати, якщо прийняти до уваги, що зміна температури димових газів в ній за час  $dt$  дорівнює різниці між кількістю теплоти в одиницях часу, що підводиться, і кількістю теплоти в одиницях часу, що відводиться:

$$T_1 \frac{d(\Delta\theta_{\text{д}})}{dt} + \Delta\theta_{\text{д}} = K_{11}\Delta G_{\text{т}} - K_{12}\Delta G_{\text{реци}} + K_{13}\Delta\theta_{\text{реци}}, \quad (3)$$

де  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  – коефіцієнти передачі топки;  $T_1$  – постійна часу топки.

Керуючою величиною прийнята  $\theta_{\text{д}}$  – температура димових газів на виході з топки,  $^{\circ}\text{C}$ , а величинами збурень – витрата пари  $G_{\text{п}}$ , кг/год; ступінь сухості пари  $X_2$ ; потужність печі  $G_{\text{x}}$ , кг/год; середня температура середовища пекарної камери  $\theta_{\text{k}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$  та парціальний тиск пари в камері випікання  $P_{\text{п}}$ , кПа.

Спростуємо та приймаємо припущення: тепловідбір і тепловіддача металу конвеєру приблизно рівні та взаємно компенсуються; втрати тепла в оточуюче середовище незначні; температура центра тістових заготовок в межах камери випікання не змінюється, а розподіл температур від центра до поверхні буде лінійним. З урахуванням прийнятих позначень та припущень рівняння теплового балансу камери випікання печі в усталеному режимі має вигляд:

$$Q_{\text{п}} + Q_{\text{т}} - Q_{\text{с}} - Q_{\text{т}} = 0, \quad (4)$$

де  $Q_{\text{п}}$  – притік тепла з насиченою парою;  $Q_{\text{т}}$  – притік тепла від поверхонь, що гріють;  $Q_{\text{с}}$  – тепло, що відноситься вентиляційною сумішшю в витяжний канал;  $Q_{\text{т}}$  – тепло, що відноситься тістовими заготовками.

Підставляючи відомі залежності для складових рівняння теплового балансу, лінеаризуючи його та роблячи відповідні перетворення, отримуємо рівняння динаміки:

$$G_{xy} \frac{d\theta_c}{dt} = \sum Q_i, \quad (5)$$

де  $Q_i$  – доданки універсального рівняння балансу теплоти в статисти;  $G_{xy} = V_{xy} \cdot \rho_c \cdot C_c$  – теплоємність об'єкта як сума теплоємності пароповітряного середовища і металу в межах камери випікання, кДж/К;  $G_{\text{м}}$  – маса металу, що сприяє теплообміну, кг;  $\rho_c$  – густина середовища, кг/м<sup>3</sup>;  $C_c$ ,  $C_{\text{м}}$  – питома теплоємність відповідно середовища та металу, кДж/кг·К.

З урахуванням великої вологості пароповітряного середовища в камері випікання печі за умови розрахунку її теплоємності можна допустити, що густина середовища дорівнює густині пари, а питома теплоємність середовища – питомій теплоємності пари ( $\rho_c = \rho_{\text{п}}$ ,  $C_c = C_{\text{п}}$ ):

$$T_2 \frac{d(\Delta\theta_c)}{dt} + \Delta\theta_d = K_{21}\Delta G_n + K_{22}\Delta x_2 - K_{23}\Delta G_x + K_{24}\Delta\theta_d - K_{25}\Delta P_n, \quad (6)$$

де  $K_{21}, K_{22}, K_{23}, K_{24}, K_{25}$  – коефіцієнти передачі камери випікання печі;  $T_2$  – постійна часу камери випікання печі.

Параметрична схема камери випікання печі, як об'єкта регулювання температури  $\theta_c, ^\circ\text{C}$ , представлена на рисунку 1.

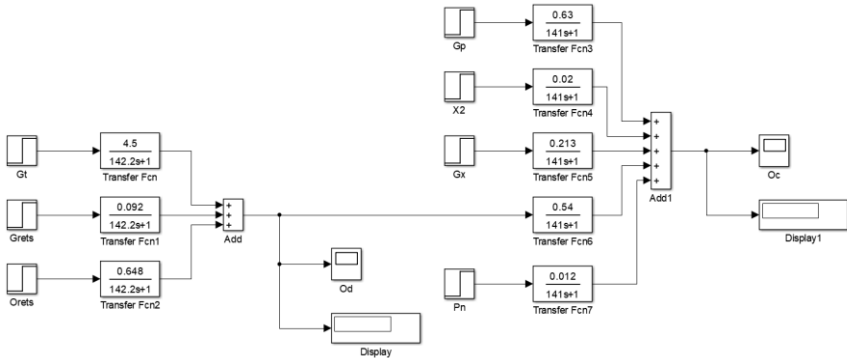


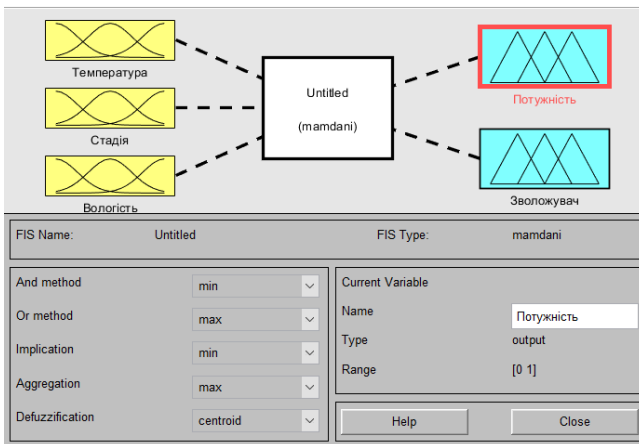
Рисунок 1 – Структурна схема моделі температурних режимів роботи хлібопекарської печі (Джерело: Створено авторами)

## Створення нечіткого контролера для регулювання температурних режимів і вологоперенесення

Метою дослідження в експериментальній частині є створення нечіткого контролера для визначення часу випікання хліба з використанням вхідних та вихідних параметрів. Контролер забезпечить: вибір необхідного режиму, нагрівання камери до потрібної температури, оптимальну вологість, витрату води та електроенергії, відповідну стадію для випікання. Постійно контролюючи процес випічки, інтелектуальна система за потреби вчасно надає необхідні корективи. Аналізуючи дослідження вчених у науковому напрямку управління випічкою хліба, був обраний метод, заснований на нечіткій логіці.

Нечітке моделювання в середовищі MATLAB виконується за допомогою пакету розширення Fuzzy Logic Toolbox.

На основі проведеного аналізу застосовано алгоритм Мамдані як основний метод нечіткого висновку для побудови оптимальної моделі інтелектуального управління. Для створення нечіткої моделі Мамдані необхідно отримати результати з трьох вхідних даних та двох даних регулювання температури. Необхідно: задати параметри нечіткої моделі регулювання температури в камері; сформулювати основу правил; поставити та побудувати функцію приналежності; вивести рішення. Інтерфейс алгоритму показано на рисунку 2.



**Рисунок 2 – Інтерфейс алгоритму нечіткого управління  
(Джерело: Створено авторами)**

Для управління випічкою в пічній камері було визначено 3 вхідні нечіткі змінні:

– Температура камери. Розбиття змінної здійснено на 3 лінгвістичні терми рівномірно в діапазоні від 0 до 260<sup>0</sup>C:  $T_1$  – низька температура,  $T_2$  – середня температура,  $T_3$  – висока температура з описом гаусовськими функціями приналежності.

– Вологість камери. Розбиття змінної здійснено на 3 лінгвістичні терми рівномірно в діапазоні від 0 до 100%:  $V_1$  – низька вологість,  $V_2$  – середня вологість,  $V_3$  – висока вологість з описом гаусовськими функціями приналежності.

– Стадії випікання хліба (зволоження, обсмажування, випікання). Розбиття змінної здійснено на 3 лінгвістичні терми:  $S_1$  – 1 стадія;  $S_2$  – 2 стадія;  $S_3$  – 3 стадія з описом функцій приналежності типу синглітон.

Набір вихідних лінгвістичних змінних визначено двома елементами:

– Регулювання споживаної потужності нагрівального елемента пекарної печі. Розбиття змінної здійснено на 3 лінгвістичні терми рівномірно в діапазоні від 1,8 до 8 кВт:  $P_1$  – низька потужність,  $P_2$  – середня потужність,  $P_3$  – висока потужність з описом трикутними функціями приналежності.

– Ввімкнення та вимкнення парового зволожувача. Розбиття змінної здійснено на 3 лінгвістичні терми рівномірно в діапазоні від 24 до 28%:  $MV_1$  – низька вологість,  $MV_2$  – середня вологість,

На основі якісних характеристик встановлено базу правил, що описують роботу об'єкта управління (ОУ), «якщо..., тоді...»: передбачається використовувати інформацію про ОУ, його поточний стан за умови правила, із висновку виводиться керуючий сигнал, що приводить ОУ у бажаний стан.

Алгоритм функціонування нечіткого регулятора представлений у вигляді правил, на основі яких у програмному комплексі регулюється

технологічний параметр системи управління. Для коректного функціонування нечіткого регулятора, заснованого на даних умовах зміни температури та вологості в камері, було складено базу правил, на підставі яких регулюватиметься технологічний процес (див. рисунок 3).

1.	If (Температура is T1) and (Стадія is S1) and (Вологість is V1) then (Потужність is P1)(Зволожувач is MV3) (1)
2.	If (Температура is T2) and (Стадія is S2) and (Вологість is V2) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV1) (1)
3.	If (Температура is T3) and (Стадія is S3) and (Вологість is V3) then (Потужність is P1)(Зволожувач is MV1) (1)
4.	If (Температура is T1) and (Стадія is S1) and (Вологість is V2) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV3) (1)
5.	If (Температура is T2) and (Стадія is S2) and (Вологість is V3) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV2) (1)
6.	If (Температура is T3) and (Стадія is S3) and (Вологість is V1) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV3) (1)
7.	If (Температура is T1) and (Стадія is S1) and (Вологість is V3) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV1) (1)
8.	If (Температура is T2) and (Стадія is S2) and (Вологість is V1) then (Потужність is P1)(Зволожувач is MV3) (1)
9.	If (Температура is T3) and (Стадія is S3) and (Вологість is V2) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV1) (1)
10.	If (Температура is T1) and (Стадія is S2) and (Вологість is V1) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV1) (1)
11.	If (Температура is T1) and (Стадія is S2) and (Вологість is V2) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV1) (1)
12.	If (Температура is T1) and (Стадія is S2) and (Вологість is V3) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV2) (1)
13.	If (Температура is T1) and (Стадія is S3) and (Вологість is V1) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV3) (1)
14.	If (Температура is T1) and (Стадія is S3) and (Вологість is V2) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV2) (1)
15.	If (Температура is T1) and (Стадія is S3) and (Вологість is V3) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV3) (1)
16.	If (Температура is T2) and (Стадія is S1) and (Вологість is V1) then (Потужність is P1)(Зволожувач is MV1) (1)
17.	If (Температура is T2) and (Стадія is S1) and (Вологість is V2) then (Потужність is P1)(Зволожувач is MV3) (1)
18.	If (Температура is T2) and (Стадія is S1) and (Вологість is V3) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV1) (1)
19.	If (Температура is T2) and (Стадія is S3) and (Вологість is V1) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV3) (1)
20.	If (Температура is T2) and (Стадія is S3) and (Вологість is V2) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV2) (1)
21.	If (Температура is T2) and (Стадія is S3) and (Вологість is V3) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV3) (1)

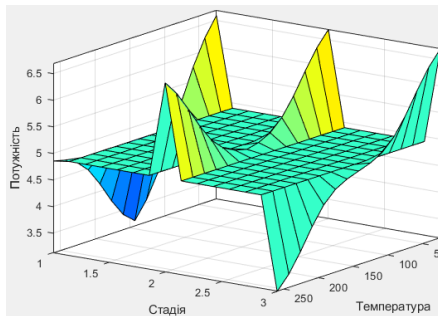
if	and	and	Then	and
Температура is	Стадія is	Вологість is	Потужність is	Зволожувач is

**Рисунок 3 – Правила функціонування системи нечіткого висновку**  
(Джерело: Створено авторами)

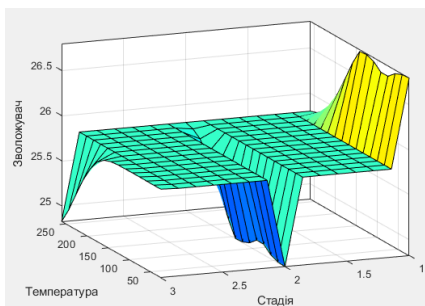
## Результати

Поверхні керування технологічним процесом за потужністю та вологістю в камері печі наведено на рисунках 4 та 5.

Згідно з рисунками 4 та 5, аналіз показав, що отримана система управління здатна працювати цілком задовільно. Також, використовуючи пункт меню "Перегляд правил", можна перевірити адекватність згенерованої моделі.



**Рисунок 4 – Поверхня нечіткого керування технологічним процесом випікання за потужністю** (Джерело: Створено авторами)



**Рисунок 5 – Поверхня нечіткого керування технологічним процесом випікання за вологістю (Джерело: Створено авторами)**

## Висновки

При модернізації системи управління хлібопекарською піччю поставлені і вирішені наступні завдання: контроль параметрів внутрішнього середовища в камерах шляхом автоматизованого управління виконавчими механізмами; проведення технологічного процесу від початку до кінця без втручання оператора, при цьому забезпечується можливість дистанційної зміни режимів випічки без зупинки процесу; управління технологічним процесом печі для регулювання температурних режимів і вологоперенесення з використанням нечіткого регулятора; розробка алгоритму управління технологічним процесом випічки хлібобулочної продукції, які виключають некоректні операції. Впровадження автоматизованої системи управління технологічним процесом дозволяє підвищити ефективність процесу за рахунок скорочення етапу розігріву печі та якість готової хлібобулочної продукції шляхом точного дотримання технологічних параметрів.

## Посилання

- Altamirano-Fortoul, R., Le-Bail, A., Chevallier, S., & Rosell, C. M. (2012). Effect of the amount of steam during baking on bread crust features and water diffusion. *Journal of Food Engineering*, 108(1), 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.015>
- Zheleva, I., & Kambourova, V. (2005). Identification of heat and mass transfer processes in bread during baking. *Thermal Science*, 9(2), 73–86. <https://doi.org/10.2298/tsci0502073z>
- Mistry, H., Ganapathi-subbu, Dey, S., Bishnoi, P., & Castillo, J. L. (2006). Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens. *Applied Thermal Engineering*, 26(17–18), 2448–2456. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.007>
- Волюх, М. Д., & Мешков, Ю. В. (2020). Дослідження показників якості хлібобулочних виробів підвищеної харчової цінності. *Вісник Херсонського Національного Технічного Університету*, 3, 107–114. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.3.14>
- Прилепа, Н., & Томаля, Т. (2023). Критерії оцінювання якості хліба та хлібобулочних виробів в Україні. *Development Service Industry Management*, 4, 145–148. [https://doi.org/10.31891/dsim-2023-4\(24\)](https://doi.org/10.31891/dsim-2023-4(24))

# Методика вибору кроку дискретизації моделі в інформаційно-вимірювальних технологіях

Валерій Мазуренко 

**Purpose.** The main aim of the research is to produce recommendations in the form of a methodology that permits designers to establish a discretization step for a simulation model, when that model is being prepared to be included into information and measurement technology, as well as sampling rate of information and measurement technology, when that technology is implemented at real-time system of process control. The methodology should be based on the characteristics of the model itself and establish simple, clear, and easy-to-use rules. It should be possible to find discretization steps without physical experiments with real objects.

**Design / Method / Approach.** The research uses theory of signals and systems and control theory. The methodology is based on the spectral characteristics of signals that circulate inside observed/controlled objects and dynamic characteristics of those objects.

**Findings.** The paper presents formulas for calculating discretization step value that is based on value of relative sampling error of signal representation, as well as on base of values of time constants given in the object model. The recommendation on how to adjust it in relation to the real-time system's main cycle value is represented as well.

**Theoretical Implications.** Results achieved under presented research develop applied methods of control theory.

**Practical Implications.** The proposed method has practical results due to giving useful instruments for real-time systems designers that simplifies processes to define the value of crucial system parameters.

**Originality / Value.** The observed problem is quite important because there are no sources that present simple and clear methodology to solve it in practice.

**Research Limitations / Future Research.** The research is limited by the category of measurement and control systems that use object model functioning in real-time mode to estimate parameters that are not directly observed.

**Paper Type.** Methodological.

## Keywords:

Discretization step, information and measurement technology, sampling rate, real-time systems, control theory

## Contributor Details:

Valeriy Mazurenko, Ph.D., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, mazurenko\_v@365.dnu.edu.ua



Період (або крок) дискретизації за часом  $\Delta t$  є важливим параметром будь-якої інформаційно-вимірювальної технології (ІВТ) так само як і будь-якої імітаційної моделі. Його вибір пов'язаний з необхідністю задовольнити двом протилежним вимогам. З одного боку, крок дискретизації доцільно вибирати більшим для того, аби знизити навантаження на обчислювальні засоби під час оброблення вимірювальної інформації. З іншого боку, його величина повинна бути досить малою, аби забезпечити працездатність моделі об'єкта контролю, закладеної в алгоритми оцінювання (наприклад у фільтр Калмана), і її достатню близькість до безперервних процесів, що виражаються цією моделлю. Додатково слід враховувати, що крок дискретизації ІВТ повинен бути кратним до кроку дискретизації, прийнятому в керуючому обчислювальному комплексі (автоматизованій системі керування технологічними процесами – АСУ ТП), тобто періоду або такту, з яким система зчитує показання вимірювачів, проводить обробку даних і формує керуючі впливи.

Питання вибору кроку дискретизації зазвичай розглядається одночасно у двох ракурсах: як стосовно імітаційного моделювання, так й стосовно реалізації ІВТ. Не зважаючи на те, що крок дискретизації може бути різним в обох цих випадках, тим не менш найбільш раціональним слід визнати підхід, коли розробники вибирають однаковий крок дискретизації як для імітаційної моделі так і ІВТ, тому що в обох цих об'єктах закладена, по суті, одна й та сама модель об'єкту, і її коректне функціонування визначається (серед інших факторів) правильним вибором величини  $\Delta t$ . Моделювання роботи ІВТ, вочевидь, слід проводити з кроком, який буде реалізований на практиці. Проводити імітаційне моделювання процесу керування об'єктом автоматизації з будь-яким кроком, відмінним від кроку, прийнятого для ІВТ, і який для даної моделі по визначенню повинен бути правильним, представляється недоцільним. З іншого боку, правильність вибору  $\Delta t$  може бути підтверджена лише самим моделюванням. Таким чином, обраний крок дискретизації повинен бути однаково прийнятним як для ІВТ, так і для процесу моделювання, а при виборі  $\Delta t$  повинні враховуватися як аспекти, пов'язані з реалізацією ІВТ (згадані в попередньому абзаці), так і сутність імітаційного моделювання. Проблематика визначення потрібного кроку дискретизації детально розглянуто в роботі Саймон та ін (2017). В роботі Мішри та ін (2020) цей вибір проводиться експериментальним шляхом з використанням реального об'єкту, що на практиці не завжди є можливим.

## Мета

Метою дослідження є формулювання рекомендацій у вигляді методики щодо визначення та раціонального вибору кроку дискретизації імітаційної моделі, яка створюється під час проєктування інформаційно-вимірювальної технології, так само як й кроку дискретизації, з яким має працювати ІВТ в своїй реалізації в АСУ ТП. Методика повинна базуватися на характеристиках самої моделі, тобто на параметрах та описах, які відомі розробникам, і встановлювати прості, ясні та зручні у використанні правила. Методика має дозволяти обрати потрібний крок ще на етапі проєктування АСУ ТП, коли

можливість проведення експериментів з реальним, фізичним об'єктом відсутня.

## Метод

Під час проектування інформаційно-вимірювальних і керуючих систем критерієм правильності вибору кроку  $\Delta t$  зазвичай є знаходження величини похибки, викликаної дискретизацією сигналів, у необхідних межах. Похибкою дискретизації вважається відмінність дійсних значень сигналу у дискретні моменти часу на виході аналогової системи від обчислених значень на виході тої дискретної системи, яка заміщає аналогову. Відносний середній квадрат похибки дискретизації:

$$\Delta_D^2 = \frac{\sigma_D^2}{\sigma_{\text{вих}}^2}, \quad (1)$$

де  $\sigma_D^2$  – середній квадрат похибки дискретизації,  $\sigma_{\text{вих}}^2$  – середній квадрат вхідного аналогового сигналу.

У системах передачі даних порівнюються первинний вхідний і відновлений вихідний аналогові сигнали, а замість похибки дискретизації використовують поняття похибки відновлення сигналу. Відносний середній квадрат похибки відновлення:

$$\Delta_B^2 = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_{\text{свх}}^2}, \quad (2)$$

де  $\sigma_B^2$  – середній квадрат похибки відновлення,  $\sigma_{\text{свх}}^2$  – середній квадрат вхідного аналогового сигналу. Похибка дискретизації, що виникає при дискретизації за часом аналогового сигналу на вході інформаційно-вимірювальної дискретної системи, так само як й похибка, що виникає при генерації дискретного сигналу, якій заміщає імітований аналоговий сигнал, є не що інше, як похибка відновлення сигналу. Через обмежену смугу пропускання системи похибка дискретизації після проходження сигналу через систему в практично реалізованих випадках зменшується:

$$\Delta_D^2 \leq \Delta_B^2 \quad (3)$$

Тобто  $\Delta_B^2$  може використовуватися в якості верхньої границі оцінювання похибки дискретизації системи.

В задачі відновлення сигналу ключову роль відіграє теорема Котельникова («теорема Найквіста — Шеннона», «теорема відліків»), яка визначає, що відновлення аналогового сигналу після його дискретизації може бути виконане без втрат, якщо частота дискретизації сигналу  $f_d$  буде відповідати наступній нерівності:

$$f_d > 2f_{\Gamma} \quad (4)$$

де  $f_{\Gamma}$  – верхня частота, якою обмежений спектр первинного сигналу. Дотримання даного співвідношення забезпечує точне відновлення первинного аналогового сигналу. Однак, теорема Котельникова застосовна лише в

ідеалізованих умовах, коли спектр сигналу обмежений. Реальні сигнали мають нескінченний спектр і, відповідно, не мають граничної частоти. Тому реалізувати формулу (4) в строгому вигляді не представляється можливим. На практиці для розрахунків  $f_d$  в якості граничної приймають таке значення частоти, яке характеризується тим, що в межах від 0 до  $f_f$  зосереджена певна задана частина всієї потужності сигналу. Подібний вибір граничної частоти приводить до появи похибки відновлення. Значення відносної похибки відновлення сигналу визначається відношенням потужності, укладеної у межах граничної частоти, до загальної потужності сигналу. Частина потужності сигналу, укладена в межах  $[-f_f; +f_f]$ , обчислюється на основі рівності Парсеваля по формулі:

$$P_f^{\text{відн}} = \frac{\int_{-f_f}^{f_f} S(2\pi f) df}{\int_{-\infty}^{+\infty} S(2\pi f) df} = \frac{\int_0^{f_f} S(2\pi f) df}{\int_0^{+\infty} S(2\pi f) df} \quad (5)$$

Відносний середній квадрат похибки відновлення:

$$\Delta_B^2 = \frac{2 \int_{f_f}^{+\infty} S(2\pi f) df}{\int_0^{+\infty} S(2\pi f) df} = 2(1 - P_f^{\text{відн}}) \quad (6)$$

Застосування співвідношень (5), (6) необхідно для обґрунтування вибору величини кроку дискретизації для ІВТ і, відповідно, – для проведення моделювання. Наприклад, задаємося величиною  $P_f^{\text{відн}} = 0,99$ , якій відповідає відносний середній квадрат похибки дискретизації не вище 2% і, користуючись формулами, які описують моделі сигналів, наявних в об'єкті, одержуємо значення верхньої границі спектра, а також припустиму по (4) граничну частоту та максимальний період дискретизації для кожного виду сигналу при заданому рівні середнього квадрата похибки. З отриманих результатів вибираємо найменший з періодів.

Слід зауважити, що крім характеристик сигналів під час вибору частоти дискретизації також повинні враховуватися динамічні характеристики об'єкта. При моделюванні крок дискретизації вибирають не менше величини домінуючої постійної часу об'єкта. Рекомендоване за класикою значення:  $(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15})$  від часу встановлення. Час встановлення, наприклад, для аперіодичної ланки першого порядку з постійною часу  $T_y$ , становить  $3T_y$ . Тоді рекомендований крок дискретизації становить:

$$\Delta t = \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{5}\right) T_y \quad (7)$$

Існують також інші рекомендації, проте всі вони близькі до наведеної (7). Наприклад, відома така рекомендація, щодо вибору кроку дискретизації цифрової моделі у співвідношенні до постійних часу об'єкту моделювання:

$$\Delta t = \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{4}\right) T_y \quad (8)$$

Наведену методику, як показано в роботі Мазуренко (2016), було застосовано та підтверджено її коректність під час створення інформаційно-

вимірювальних технологій.

## Результати

Резюмуємо отримані результати у вигляді методики. Послідовність дій з визначення кроку дискретизації для реалізації певної інформаційно-вимірювальної технології виглядає таким чином.

1. За формулами (5) та (6) розраховуємо крок дискретизації виходячи зі спектральних властивостей сигналів.

2. За формулою (7) визначаємо крок дискретизації, виходячи з динамічних властивостей об'єкту.

3. Вибираємо менше з двох отриманих значень.

4. Отримане значення кроку дискретизації зменшуємо таким чином, аби воно було кратним до значення тривалості такту роботи АСУ ТП, тобто кроку дискретизації, прийнятому в АСУ ТП.

Далі необхідно провести моделювання та перевірити адекватність цифрової моделі з вибраним кроком дискретизації. Питання адекватності моделей розглянуто в роботі Жученко та ін. (2019).

## Висновки

В результаті проведених досліджень було розроблено зручну для практичного використання методику вибору кроку дискретизації моделі в інформаційно-вимірювальних технологіях. Запропонована методика об'єднує методи, основані на використанні різних характеристик об'єкту, як то спектральні характеристики сигналів, динамічні характеристики ланок, а також суто технічні параметри, як то такт роботи АСУ ТП, в якій безпосередньо реалізується ІВТ, та водночас не потребує проведення випробувань з реальним об'єктом.

## References

- Mishra, I., Tripathi, R. N., & Hanamoto, T. (2020). Synchronization and Sampling Time Analysis of Feedback Loop for FPGA-Based PMSM Drive System. *Electronics*, 9(11), 1906. <https://doi.org/10.3390/electronics9111906>
- Simon, D., Seuret, A., & Sename, O. (2017). Real-time control systems: feedback, scheduling and robustness. *International Journal of Systems Science*, 48(11), 2368–2378. <https://doi.org/10.1080/00207721.2017.1316879>
- Мазуренко, В. Б. (2016). Реалізація вычислительных методов повышения точности дозирования топливных баков ракеты-носителя морского базирования. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка*, 24(4), 49–59. <https://tinyurl.com/jrst-2016-24-4>
- Левчук, І. Л., Манко, Г. І., Тришкін, В. Я., & Корсун, В. І. (2019). *Теорія і практика ідентифікації об'єктів управління*. ДВНЗ УДХТУ. <http://citm.ho.ua/Txt/Mono.pdf>

# Using micro:bit for building distributed sensor networks in robotic systems

Roman Duban , Yurii Yurko 

**Purpose.** The purpose of the paper is to explore the possibilities of integrating the micro:bit microcontroller with external devices through UART, I2C, and SPI protocols to create modular and distributed sensor networks in robotic systems. The article focuses on the compatibility issues of these protocols with other devices and possible solutions. **Design / Method / Approach.** The paper uses an experimental approach, examining the use of standard communication protocols to connect micro:bit with external sensors and controllers, such as Raspberry Pi, to build a modular sensor network. **Findings.** It was found that micro:bit supports all major communication protocols, but there are compatibility issues with the radio protocol and external devices. UART, I2C, and SPI allow micro:bit to integrate with a wide range of sensors and devices, but additional configuration is needed for stable operation. **Theoretical Implications.** The article demonstrates that the use of standard protocols for integrating devices into robotic systems is a key aspect of creating modular sensor networks. It shows that micro:bit can be an important component to developing such systems. **Practical Implications.** The results can be applied in educational projects and for the creation of modular robotic systems where micro:bit acts as a manager module of different sensors. This expands the potential use of inexpensive microcontrollers in real-world scenarios. **Originality / Value.** The article contributes to research on integrating micro:bit into robotic systems, which is important for educational robotics, as it shows new possibilities for using microcontrollers in distributed systems. **Research Limitations / Future Research.** The limitation of the study is that it is based on theoretical assumptions about protocol stability when connecting multiple modules. Future research should focus on real-world testing of compatibility with other devices and optimizing wireless communication. **Paper Type.** This is a technical note with both experimental and theoretical elements, exploring the issues of integrating micro:bit into distributed systems.

## Keywords:

distributed sensor network, microcontroller, robotic system, communication protocols, modular system

---

## Contributor Details:

Roman Duban, Cand.Sc., Sr.Lect., Kharkiv University of Technology "STEP":  
Kharkiv, UA, [duban\\_r@itstep.academy](mailto:duban_r@itstep.academy)

Yurii Yurko, Cand.Sc., Assoc.Prof., Kryvyi Rih National University: Kryvyi Rih, UA,  
[yurko@yahoo.com](mailto:yurko@yahoo.com)



In modern robotic systems, distributed sensor networks play a crucial role in providing efficient data collection, processing, and transmission for real-time decision-making. These networks can be built using microcontrollers and connected sensors with configured communication protocols. Modern microcontroller boards are becoming increasingly powerful and often include basic sensors, making it easier to integrate them into robotic projects. One of the most attractive options today is the micro:bit board from BBC, which includes built-in sensors and supports wireless communication through its built-in radio channel (Ruch, 2022).

Micro:bit also provides an additional layer of abstraction that significantly simplifies the programming and configuration of communication protocols. This makes micro:bit a convenient tool for building distributed sensor networks using standard communication protocols such as UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), I2C (Inter-Integrated Circuit), and SPI (Serial Peripheral Interface). Therefore, it is important to explore how micro:bit can be used to build distributed sensor networks with flexible architecture and reliable communication, as well as its integration into more complex systems like ROS2 (Robot Operating System 2), where communication capabilities play a key role in ensuring the reliability and efficiency of such networks.

## **Purpose**

The purpose of this study is to explore the possibilities of integrating micro:bit into robotic systems using standard communication protocols. The central micro:bit module will be connected to the Raspberry Pi 4 via the UART protocol, which ensures full-duplex data exchange. I2C will be used for inter-module communication, allowing for the creation of a distributed sensor network, while SPI will serve for connecting powerful sensors to individual microcontrollers. Special attention is given to the use of the built-in micro:bit radio protocol as a backup channel for wireless communication between modules, enabling reliable communication in the event of failures in the primary communication channels or when modules are remotely located.

This study also addresses compatibility and reliability issues of the mentioned protocols when building scalable sensor networks, as well as their integration with more powerful systems such as ROS2.

## **Materials and Methods**

### ***Hardware component***

In recent years, the micro:bit board from BBC has gained significant popularity due to its ease of use and accessibility for various age groups, from schoolchildren to developers and students. It is widely recognized as a convenient and powerful tool in STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) education, making it easier to teach fundamental concepts in programming, electronics, and robotics. Micro:bit is equipped with several built-in sensors, such as an

accelerometer, magnetometer, thermometer, and light sensor, which makes it suitable for creating basic sensor networks without the need for additional devices. Despite its small size (approximately half the size of a credit card), the micro:bit can be easily integrated into various projects (Voštinár, P., & Knežník, J. 2020). For more convenient interaction with digital ports, an additional connector can be used, allowing the board to be connected similarly to a cartridge.

This research utilized several micro:bit v2.2 boards, functioning as the main communication module, a connected module, and a module interacting via the radio protocol. Each of these modules, in addition to built-in sensors, supported the connection of external sensors via standard communication protocols. This enabled the creation of distributed sensor networks, where certain modules could interact without direct wired connections. Micro:bit supports wireless communication through a radio channel, which operates over distances of up to 20 meters. This radio protocol is particularly useful for robotic systems, where individual modules can identify themselves before physically connecting to the main module. Such an approach is effective for robots with interchangeable parts, allowing them to be detected before being physically connected or for providing a backup communication channel in case of wired connection failures.

A Raspberry Pi 4 single-board computer was used for data collection and processing, serving as the central processing unit for signals from all the micro:bit modules. The computing power of the Raspberry Pi allows to use it in robotics and IoT (Internet of Things) projects (Ahmad, B. et al., 2023). Using Raspberry Pi board in the research allowed for complex calculations that would otherwise be impossible on the micro:bit due to its limited resources.

Thus, the hardware architecture of this research combined the accessibility and modularity of micro:bit with the processing power of Raspberry Pi, enabling the creation of a distributed sensor network for real-time data collection and analysis. This is particularly relevant in the context of STEM education, where micro:bit helps to practically teach the basics of sensor systems and robotics.

### **Software component**

The micro:bit platform is distinguished by its high level of abstraction, which greatly simplifies programming for users of different skill levels. Thanks to this additional abstraction layer, micro:bit can be programmed using a variety of languages and environments, most notably JavaScript (via the MakeCode block editor) and Python. For educational purposes and simpler tasks, the MakeCode environment allows users to program micro:bit using a block-based approach, making it especially suitable for young students or beginners. The blocks can also be converted into JavaScript code, providing an easy transition to text-based programming (Cederqvist, AM. 2022).

When more advanced control over the hardware is required, micro:bit also supports MicroPython. This lightweight version of Python is specifically optimized for microcontroller programming and offers a syntax very close to that of standard Python. However, certain functions in MicroPython are tailored to the specific needs of microcontroller environments, such as handling GPIO pins and

interacting with onboard sensors. This research relied on the functionalities provided by MicroPython, which was sufficient to implement the desired features without needing to delve into the lower levels of abstraction available through C. For more advanced tasks that require low-level control of the hardware, C programming can be employed. This approach gives developers direct access to micro:bit's internal registers and peripherals, which can be crucial when optimizing performance or handling hardware interruptions. While MicroPython is easier and faster to use for most tasks, C provides the flexibility to maximize the hardware's capabilities when necessary.

On the Raspberry Pi 4, which served as the central processing unit for the distributed sensor network, the Raspbian (a Debian-based Linux operating system) was installed. This system provided the necessary environment to run ROS2, which is widely used in robotics for handling sensor data, executing control algorithms, and managing communication between various hardware modules (Carreira, R. et al., 2024).

In this research, ROS2 played a key role in integrating the data from the various micro:bit modules into a unified system. Through ROS2, it was possible to manage the sensor data streams coming from multiple sources, visualize the collected data in real-time, and analyze sensor readings for further processing. By leveraging ROS2's modular architecture, the system could be easily scaled to include additional micro:bit modules or other sensors connected via Raspberry Pi.

Moreover, ROS2 enabled seamless communication between the different components of the network, allowing the Raspberry Pi to interact with the distributed micro:bit modules, process the data, and send commands back to individual sensors. This setup facilitated real-time control and decision-making, crucial for efficient robot operation in dynamic environments.

Through the use of MicroPython on micro:bit and ROS2 on Raspberry Pi, this system demonstrated how low-cost microcontrollers can be effectively integrated into more complex and powerful robotics frameworks.

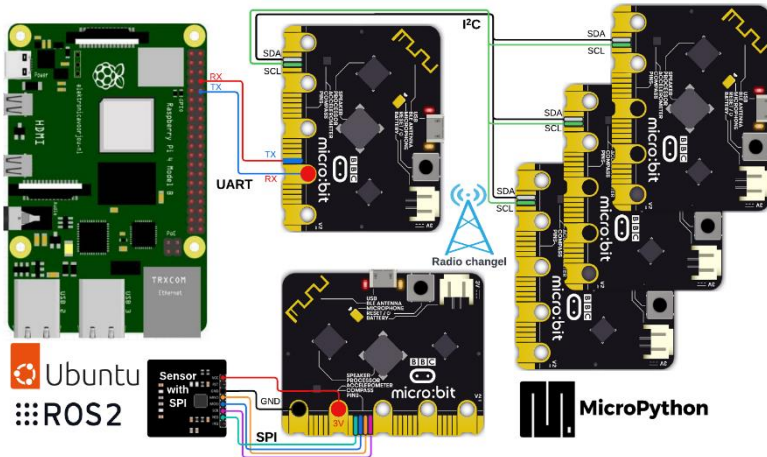
### ***Communication protocols and architecture***

The BBC micro:bit microcontroller offers a flexible approach to building sensor networks with its support for several communication protocols, such as UART, I2C, and SPI, while also providing a built-in radio protocol for wireless communication. Despite the additional abstraction layer that simplifies programming, this study aims to explore how these communication protocols can be effectively utilized to create a robust, distributed sensor network. The network was designed to ensure reliable data transmission in real-time, even under potential communication failures. According to research (Zhuang, C. 2024), the UART, I2C, and SPI protocols each have their unique advantages and limitations for integration into measurement and control devices, allowing for an informed choice of the appropriate protocol for a specific system. This study detailed how these protocols impact the reliability and performance of sensor networks in distributed robotics systems.

The system was built with several micro:bit v2.2 boards, where each board



had specific responsibilities: one functioned as the central module connected to a Raspberry Pi 4, while the others acted as peripheral modules that communicated through various protocols depending on their roles. Figure 1 visually represents the central micro connected to the Raspberry Pi via UART, with additional micro:bit modules connected through I2C, and high-speed sensors linked via SPI.



**Figure 1 – System Architecture for distributed sensor networks (Source: Authors)**

It also shows remote modules communicating over the radio protocol, highlighting the redundancy in the communication channels.

Communication protocols:

- UART: The central micro:bit was connected to the Raspberry Pi 4 using the UART protocol, enabling full-duplex data transfer. This connection served as the backbone for the network, transmitting data between the distributed micro:bit modules and the Raspberry Pi. The real-time processing of sensor data and control signals was handled by ROS2, which was installed on the Raspberry Pi.

- I2C: The I2C protocol was used to interconnect the micro:bit modules, allowing multiple peripheral devices to communicate with the central module. Each micro:bit module, assigned a unique address, contributed to the distributed sensor network. This configuration enabled scalable communication across several modules without adding extra wiring for each device.

- SPI: High-speed sensors, such as cameras or motion detectors, were connected to the micro:bit boards via the SPI protocol. Although SPI requires additional GPIO pins for each connected sensor, it provided the necessary speed and efficiency for transmitting large amounts of data. The microcontroller handled these high-speed sensors to offload processing from the Raspberry Pi.

- Radio Protocol: One of the key features of micro:bit is its built-in radio protocol. In this study, the radio protocol was used to establish a wireless mesh

network between the micro:bit modules, allowing communication across distances up to 20 meters. This was particularly useful for scenarios where the modules were not physically connected via I2C, as the radio protocol acted as a backup channel when primary wired communication failed. The central micro:bit served as a bridge between the wireless nodes and the Raspberry Pi, translating data between different communication layers.

The final architecture represented a hybrid approach, leveraging both wired and wireless communication. The architecture ensured redundancy and robustness by allowing fallback to the radio protocol in the event of I2C failure or module disconnection. Additionally, SPI provided high-speed communication for complex sensors, while UART maintained full-duplex communication with the Raspberry Pi for real-time data processing.

### **Experimentation Process**

To validate the functionality and reliability of this hybrid communication system, a series of experiments were conducted, including the following steps:

1. Initial integration: the experiment began with connecting the central micro:bit to the Raspberry Pi 4 through UART for real-time, full-duplex data transmission. The setup ensured that ROS2 on the Raspberry Pi could handle the incoming data from the distributed network efficiently.

2. Peripheral sensor integration: additional sensors were connected to the micro:bit modules using SPI. Stability tests were conducted to evaluate the reliability of SPI communication under different data loads and conditions.

3. Radio communication between modules: the radio protocol was tested to assess the performance of wireless communication between the micro:bit modules. The experiment examined the feasibility of using the radio protocol as a backup for the I2C connection, ensuring that the system could maintain communication even in case of failures.

4. Data analysis: the data collected from the micro:bit modules was transmitted to the Raspberry Pi and processed in ROS2. The analysis focused on visualization of the sensor data, performance evaluation of the network, and command execution on the peripheral modules. Additionally, the experiment assessed the impact of radio protocol range on system performance.

Particular attention was given to the reliability of the system when using the radio protocol as a backup communication channel. In cases where the I2C connection was interrupted, the system automatically switched to radio communication, minimizing data loss. This feature ensured that the network remained operational even in scenarios where wired connections were compromised.

### **Discussion and Results**

The results of the study showed that micro:bit can be effectively integrated into distributed sensor networks through standard protocols such as UART, I2C,

and SPI. UART demonstrated stability for full-duplex data exchange between the micro:bit microcontroller and the powerful ROS2 platform on the Raspberry Pi 4, allowing for real-time control of peripheral modules and data processing.

The I2C protocol exhibited sufficient bandwidth for connected modules but required additional configuration for stable operation with a large number of modules. The micro:bit radio protocol proved to be an effective means of providing backup wireless communication between modules. However, it was found that simultaneous use of radio and BLE is not possible, limiting its application in Bluetooth scenarios. The SPI protocol demonstrated high data transfer speeds but needed extra configuration for compatibility with various devices. This protocol is well-suited for sensors that require high-speed data transmission.

## Conclusions

The study confirmed that micro bit can be effectively used to build distributed sensor networks by integrating through UART, I2C, and SPI with external sensors and more powerful platforms such as ROS2. The radio protocol provides a reliable backup communication channel, enhancing the system's reliability during failures of primary channels and facilitating interaction with modules disconnected from the central unit. However, issues of stability and compatibility when connecting a large number of devices require further investigation. Future work should focus on optimizing the performance of protocols and improving wireless communication, including support for BLE.

## References

- Ruch, A. (2022). Micro:bit; Cheap and Simple Hardware for Coding. In *3rd International STEM Education Conference Proceedings* (pp. 26-37). Pusula 20 Teknoloji ve Yayıncılık A.Ş. [https://www.stempd.net/wp-content/uploads/2021/01/Proceedings\\_3rd-International-STEM-Education-Conference.pdf](https://www.stempd.net/wp-content/uploads/2021/01/Proceedings_3rd-International-STEM-Education-Conference.pdf)
- Voštinár, P., & Knežník, J. (2020). Education with BBC micro:bit. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (IJOE)*, 16(14), 81–94. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v16i14.17071>
- Ahmad, B., Ahmed, R., Masroor, S., Mahmood, B., Hasan, S. Z. U., Jamil, M., Khan, M. T., Younas, M. T., Wahab, A., Haydar, B., Subhani, M., Khan, M. A., & Tariq, S. (2023). Evaluation of Smart Greenhouse Monitoring System using Raspberry-Pi Microcontroller for the Production of Tomato Crop. *Journal of Applied Research in Plant Sciences*, 4(01), 452–458. <https://doi.org/10.38211/joarps.2023.04.01.54>
- Cederqvist, A.-M. (2021). Designing and coding with BBC micro:bit to solve a real-world task – a challenging movement between contexts. *Education and Information Technologies*, 27(5), 5917–5951. <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10865-w>
- Carreira, R., Costa, N., Ramos, J., Frazão, L., & Pereira, A. (2024). A ROS2-Based Gateway for Modular Hardware Usage in Heterogeneous Environments. *Sensors*, 24(19), 6341. <https://doi.org/10.3390/s24196341>
- Zhuang, C. (2024). Comparison And Selection of Commonly Used Communication Protocols in Measurement and Control Instruments. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 81, 540–546. <https://doi.org/10.54097/em4syb59>

# Вибір параметрів моделі руху ракети-носія для виведення космічних апаратів на кругові орбіти

Руслан Кеба , Анатолій Кулабухов 

**Purpose.** This study aims to justify the selection of parameters for a launch vehicle's pitch angle program during the insertion of spacecraft into circular orbits. The goal is to improve the accuracy and efficiency of the insertion process, optimizing the delivery of payloads to their target orbits. **Design / Method / Approach.** The research develops a detailed mathematical model that defines the pitch angle of a launch vehicle, specifically focusing on the relationships between the vertical and horizontal velocity components. These velocity components are represented as parabolic functions, and the model's coefficients are chosen based on numerical simulations using real flight data from the Falcon 9 rocket. Additionally, an analytical approach is presented to evaluate how different parameters influence the final orbit insertion. **Findings.** Analytical dependencies for model parameter selection are established, closely matching numerical simulations and confirming the validity of the approach for ensuring precise spacecraft insertion into circular orbits. **Theoretical Implications.** The model provides a new approach to calculating pitch angle programs using parabolic functions, contributing to the theoretical understanding of launch vehicle dynamics during orbital insertion. **Practical Implications.** The method can improve the efficiency of pitch angle programs for launch vehicles during the active phase of flight, optimizing payload delivery and enabling higher orbital insertions. **Originality / Value.** This research presents a novel methodology for modeling pitch angle programs, improving accuracy and efficiency in spacecraft orbit insertion. **Research Limitations / Future Research.** The model assumes simplified velocity profiles and does not account for atmospheric drag or real-time adjustments, which could be included in future research. **Paper Type.** Methodological.

## Keywords:

launch vehicle dynamics, spacecraft circular orbit insertion, mathematical model, pitch angle program, orbital trajectory optimization

## Contributor Details:

Ruslan Keba, PhD Student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [phd@kebamail.com](mailto:phd@kebamail.com)

Anatoly Kulabukhov, PhD, Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [kulabukhov@ukr.net](mailto:kulabukhov@ukr.net)



Більшість супутникових систем для підтримки стабільності угруповання супутників у просторі за існуючими технологіями використовують кругові орбіти. Вивід космічних апаратів на такі орбіти здійснюється ракетами-носіями, для яких важливим є вибір оптимального кута тангажу, що може сприяти або збільшенню корисного навантаження, що виводиться на орбіти, або вивід заданого навантаження на більш високі орбіти. Існує кілька методів формування такої програми (Кеба & Kulabukhov, 2023; Dwi et al, 2017; de Volo et al, 2017; Wang et al, 2022; Aksen et al, 2024). В (Кеба & Кулабухов, 2024) запропонований метод вибору програми кута тангажу, який визначається відношенням горизонтальної до вертикальної складової швидкості польоту. В якості моделі руху запропоновані параболічні моделі цих складових швидкостей руху ракет-носіїв, які близькі до реальних процесів, отриманих з ракети-носія Falcon 9 (Shahar603, 2020). Було також запропоновано методику обрання коефіцієнтів таких моделей за характеристиками ракети-носія. Але в цієї моделі не були встановлені залежності між параметрами обрання деяких коефіцієнтів моделі, які б забезпечували вивід космічного апарата на задану висоту з заданою швидкістю.

## Мета та завдання

Оптимізація програми кутового руху ракети-носія за кутом тангажу є критично важливим завданням для космічної галузі, оскільки безпосередньо впливає на ефективність виводу корисного навантаження на задані орбіти. У попередній роботі (Кеба & Кулабухов, 2024) була запропонована модель руху, яка базується на параболічних функціях, що описують вертикальну і горизонтальну складові швидкості. Проте залишається невирішеним питання встановлення аналітичних залежностей між параметрами цієї моделі та кінцевими характеристиками орбіти космічного апарата.

Мета роботи полягає у розробці та обґрунтуванні математичної моделі для визначення оптимальних параметрів кутового руху ракети-носія під час виводу космічного апарата на кругові орбіти, що дозволить підвищити ефективність використання енергетичних можливостей ракети-носія.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

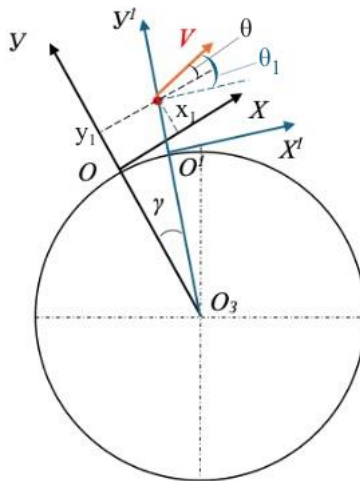
- встановити аналітичні залежності між параметрами параболічної моделі складових швидкості та кінцевими характеристиками орбіти;
- розробити методику визначення оптимальних параметрів моделі для заданих характеристик кругової орбіти;
- провести верифікацію отриманих результатів шляхом порівняння з даними чисельного моделювання.

Об'єктом дослідження є процес руху ракети-носія на активній ділянці траєкторії. Предметом дослідження є математична модель програми кутового руху ракети-носія за кутом тангажу, яка оснований на параболічних функціях складових швидкості руху.

## Обговорення та результати

Розглядається задача створення програми кута тангажу ракети-носія з інерційною системою наведення для виводу космічного апарата на кругову орбіту. Показано в (Кеба & Кулабухов, 2024), що доцільно створювати програму в орбітальній системі координат, в якій кут тангажу в процесі виводу на кругову орбіту в кінцевій точці повинен дорівнювати нулю, що значно спрощує модель кутового руху. Зв'язок між інерційною і орбітальною системою координат показаний на рис. 1.

На рис. 1 введені наступні позначення:  $YOX$  – інерційна система координат;  $Y'O'X'$  – орбітальна система координат;  $x_1, y_1$  – координати ракети в інерційній системі координат;  $\theta$  – кут тангажу в інерційній системі координат;  $\theta_1$  – кут тангажу в орбітальній системі координат;  $\gamma$  – центральний кут повороту орбітальної системи координат відносно інерційної;  $\dot{x}$  – проекція швидкості на ось  $X$  в інерційної системі координат;  $\dot{y}$  – проекція швидкості на ось  $Y$  в інерційної системі координат.



**Рисунок 1 – Зв'язок інерційної і орбітальної систем координат**  
(Джерело: Створено авторами)

Встановлена залежність між кутами тангажу в інерційній і орбітальній системах координат. Кут тангажу в інерційній системі координат буде визначатися виразом

$$\theta = \arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \quad (1)$$

В орбітальній системі координат значення координати ракети по осі  $Y'$  буде

$$y_1^1 = R_3 + h \quad (2)$$

де  $R_3$  – радіус Землі;  $h$  – висота орбіти.

Центральний кут в інерційній системі координат можна визначити наступним чином

$$\gamma = \arctg \frac{x_1}{R_3 + y_1}. \quad (3)$$

Зв'язок між кутами тангажу в інерційній і орбітальній систем координат буде

$$\theta_1 = \theta + \gamma. \quad (4)$$

При виводі космічного апарата на кругову орбіту кінцеве значення кута тангажу в орбітальній системі координат повинно дорівнювати нулю. Тоді в інерційній системі координат в програмі тангажу на кінцевій ділянці польоту повинно виконуватися умова

$$\theta = -\gamma. \quad (5)$$

На підставі аналізу зміни швидкості та програм тангажу запропоновано вибір програму тангажу за законом

$$\theta = \arctn \frac{v_x}{v_y} \quad (6)$$

Для вибору моделі зміни цих складових швидкостей були взяті характеристики зміни цих швидкостей на ракеті-носії Falcon 9 FT, які наведені на рис. 2 (Shahar603, 2020).

Кожну із цих складових швидкості можна описати певною математичною залежністю. Запропоновано описати ці залежності параболічними функціями у вигляді:

$$V_x(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t < t_1 \\ a_x t^2 + b_x t + c_x, & \text{якщо } t \geq t_1 \end{cases}; \quad (7)$$

$$V_y(t) = a_y t^2 + b_y t + c_y, \quad (8)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – деякі постійні коефіцієнти.

Враховуючи вид зміни складових швидкостей, які представлені на рис. 2, моделі представлені у виді

$$V_x(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t < t_1 \\ k_1(t - t_1)^2, & \text{якщо } t \geq t_1 \end{cases}; \quad (9)$$

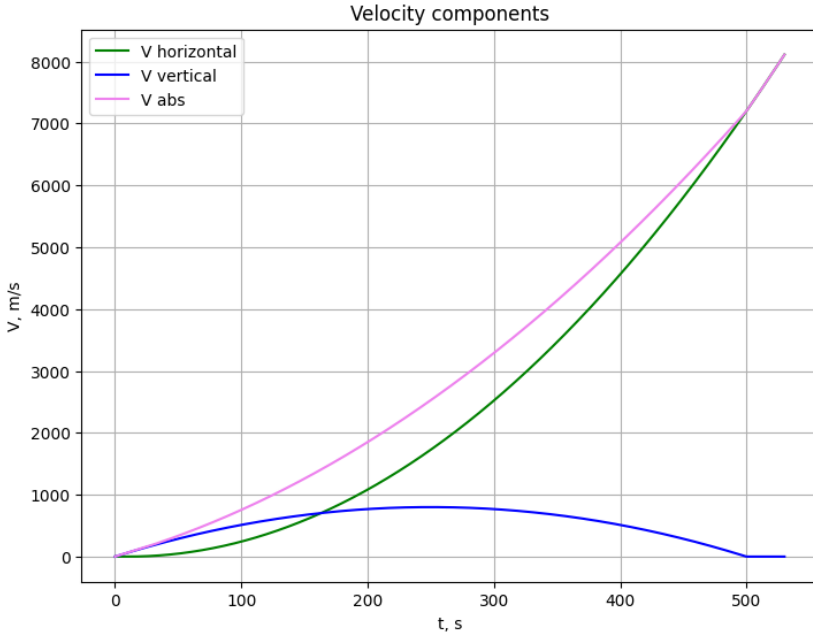
$$V_y(t) = -k_2(t - t_{cp})^2 + V_{ymax}, \quad (10)$$

де  $t_1$  – час вертикального зльоту ракети-носія;  $t_{cp}$  – середній час польоту ракети-носія на активній ділянці;  $k_1$  і  $k_2$  – постійні коефіцієнти, які обчислюються з умов отримання кінцевої швидкості на заданій висоті і максимальній швидкості  $V_{ymax}$  по горизонтальній складовій швидкості

$$k_1 = \frac{V_{kp}}{(t_k - t_1)^2},$$

$$k_2 = \frac{V_{кр} - V_{ymax}}{t_{ср}^2},$$

де  $V_{кр}$  – кругова швидкість, яку потрібно досягти ракеті-носію на заданій кі-  
нцевій висоті;  $t_{к}$  – час польоту ракети-носія на активній ділянці.



**Рисунок 2 – Характер зміни горизонтальної і вертикальної складових швидкості ракети-носія (Джерело: Створено авторами)**

Вихідними даними до створення програми руху по тангажу за методикою, що пропонується, є висота орбіти  $h$ , час польоту  $t$ , час вертикального зльоту ракети-носія  $t_1$  і кругова швидкість  $V_{кр}$ , яка залежить від висоти і може бути визначена виразом

$$V_h = \sqrt{\frac{GM}{R_3+h}}, \quad (11)$$

де  $G$  – гравітаційна стала  $6.67430 \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$ ;  $M$  – маса Землі  $5.972 \times 10^{24} \text{ кг}$ ;  $R_3$  – радіус Землі  $6.371 \times 10^6 \text{ м}$ .

Величина  $V_{ymax}$  повинна залежати від  $V_{кр}$  і забезпечувати вивід космічного апарата на задану висоту. Щоб забезпечити цю умову і визначитись з її величиною було проведення моделювання руху ракети-носія за визначеною методикою з різною  $V_{ymax}$  для висот 300, 400, 500, 600 та 700 км. Результат моделювання, який забезпечує вивід на кругову орбіту на висоту 500 км наведений на рис. 3, 4.



Також запропоновано підхід для визначення цієї залежності аналітично. Для цього випадку рівняння вертикальної швидкості буде мати вигляд:

$$V_y(t) = \frac{-4V_{y\max}}{t_e^2} t^2 + \frac{4V_{y\max}}{t_e} t \quad (12)$$

Звідки висота орбіти  $h$  визначається як інтеграл цього рівняння:

$$h(t) = \int_0^{t_e} V_y(t) dt = \int_0^{t_e} \left( \frac{-4V_{y\max}}{t_e^2} t^2 + \frac{4V_{y\max}}{t_e} t \right) dt = \frac{-4V_{y\max}}{3t_e^2} t^3 + \frac{2V_{y\max}}{t_e} t^2 + C \quad (13)$$

де  $t_e$  – час закінчення активної ділянки руху.

Враховуючі початкові і кінцеві умови отримуємо:

$$h(t_e) = -\frac{4V_{y\max}}{3t_e^2} t_e^3 + \frac{2V_{y\max}}{t_e} t_e^2. \quad (14)$$

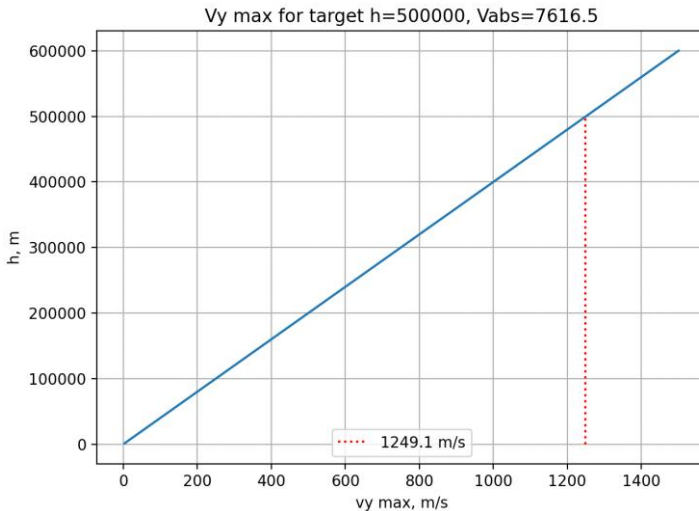
Спростуючи вираз, маємо:

$$h(t_e) = \frac{2}{3} V_{y\max} t_e. \quad (15)$$

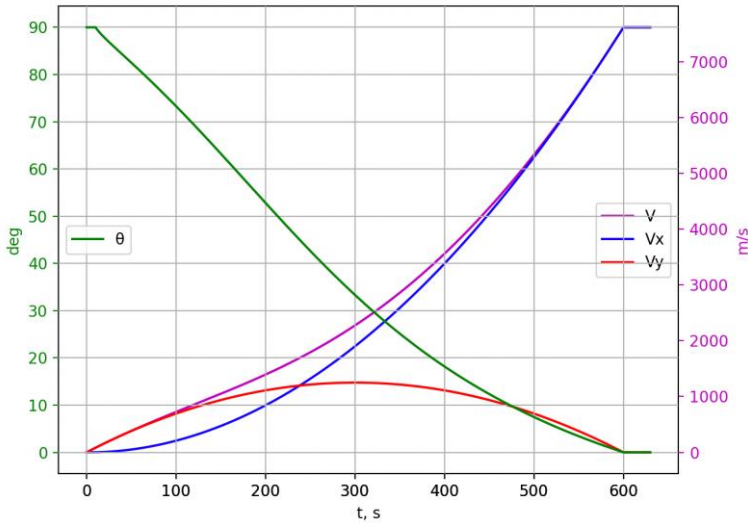
Звідки

$$V_{y\max} = \frac{3h(t_e)}{2t_e} \quad (16)$$

Тобто  $V_{y\max}$  прямо пропорційне залежить від висоти орбіти та зворотно пропорційне від  $t_e$  — часу активної ділянку руху. Результати чисельного моделювання і аналітичні залежності визначення  $V_{y\max}$  наведені в табл. 1.



**Рисунок 3 – Значення максимальної вертикальної швидкості  $V_{y\max}$  для орбіти 500 км (Джерело: Створено авторами)**



**Рисунок 4 – Програма тангажу  $\theta$  і складові швидкості для орбіти висотою 500 км (Джерело: Створено авторами)**

**Таблиця 1 – Результати чисельного моделювання і отримані аналітичні залежності визначення  $V_{y\max}$  від висоти (Джерело: розроблено авторами)**

Висота орбіти, км	Значення $V_{y\max}$ отримане чисельним моделюванням, м/с	Значення $V_{y\max}$ отримане аналітично, м/с
300	749,8	750
400	1001,3	1000
500	1249,1	1250
600	1501,0	1500
700	1749,4	1750

## Висновки

Розроблена математична модель для визначення параметрів кутового руху ракети-носія при виводі космічного апарата на кругові орбіти, яка використовує параболічні функції вертикальної та горизонтальної складових швидкості.

Отримана аналітична залежність обрання параметрів запропонованої моделі від кінцевих даних руху ракети-носія при виводі космічного апарата на кругову орбіту. Означені аналітичні залежності параметрів моделі збігаються з результатами чисельного моделювання, що підтверджує достовірність отриманих результатів.

Створена математична модель може бути використана для визначення ефективної програми кутового руху ракети-носія за кутом тангажу під час виводу космічного апарата на кругові орбіти.

## Посилання

- Aksen, U., Aslan, A. R., & Goker, U. D. (2024). Comprehensive Six-Degrees-of-Freedom Trajectory Design and Optimization of a Launch Vehicle with a Hybrid Last Stage Using the PSO Algorithm. *Applied Sciences*, 14(9), 3891. <https://doi.org/10.3390/app14093891>
- de Volo, G. D. C. B., Naeije, M., Roux, C., & Volpi, M. (2017). Vega launchers' trajectory optimization using a pseudospectral transcription. *In Proceedings of the European Conference for Aeronautics and Space Sciences* (pp. 1-15). <https://doi.org/10.13009/EUCASS2019-710>
- Dwi, L., Herlambang, S., & Muhammad, R. D. (2017). Optimization pitch angle controller of rocket system using improved differential evolution algorithm. *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*, 3(1), 27-34. <https://doi.org/10.26555/ijain.v3i1.83>
- Keba, R., & Kulabukhov, A. (2023). Аналіз методів і моделей руху ракето-носіїв на активній дільниці. *Journal of Rocket-Space Technology*, 32(4), 76-82. <https://doi.org/10.15421/452331>
- Shahar603 (2020). Telemetry-Data. GitHub. <https://github.com/shahar603/Telemetry-Data>
- Wang, X., Dai, P., Cheng, X., Liu, Y., Cui, J., Zhang, L., & Feng, D. (2022). An online generation method of ascent trajectory based on feedforward neural networks. *Aerospace Science and Technology*, 128, 107739. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107739>
- Кеба, Р., & Кулабухов, А. (2024). Методика визначення програми кута тангажу для виводу космічних апаратів на кругові орбіти. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 249-254. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/136>

# Інтегрування нестационарних систем оптимального керування із післядією та нестабільним спектром

Петро Самусенко , Тетяна Новік ,  
Микола Рашевський 

**Purpose.** We considered a non-stationary optimal control system with delay. Non-stationary optimal control systems are described by systems of differential or differential-algebraic equations. Variable coefficients do not allow, in general, to construct a solution to such systems in quadratures. Numerical or asymptotic methods are used to solve such systems. **Design / Method / Approach.** In this paper, asymptotic methods are used, in particular, the Feshchenko-Shkil' method for integrating singularly perturbed systems and the Wasow's method for systems with an unstable spectrum. **Findings.** In this paper, we construct a transformation that reduces the optimal delay control system to a system that does not contain terms without rejecting the argument. This transformation makes it possible to integrate the system by the method of steps without solving systems of differential equations at each step. **Theoretical Implications.** The system of equations obtained as a result of the transformation of the original system is somewhat easier to study in terms of building a solution. However, the problem of optimizing the control of both systems requires both a separate mathematical study and clarification of the practical reality of spectrum instability in such systems. **Practical Implications.** If the instability of the spectrum is caused by the degeneracy of the main matrix, this leads to the unboundedness of the system solution as the small parameter approaches zero. The aforementioned growth of the solution can create emergency situations in real systems. **Originality / Value.** The delayed control systems in the described formulation are studied for the first time. **Research Limitations / Future Research.** Future research concerns solving the problem of optimal control of systems with an unstable spectrum and studying the question of the reality and physical meaning of turning points in specific systems. **Paper Type.** Conceptual Paper.

## Keywords:

system of automatic control, systems of differential equations with degenerations, asymptotic solution, turning point, systems with delays

## Contributor Details:

Petro Samusenko, Dr.Sc., Prof. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute": Kyiv, UA, [psamusenko@ukr.net](mailto:psamusenko@ukr.net)

Tetiana Novik, Sr.Lect., Separate structural division "Kryvyi Rih Professional College of the National Aviation University": Kryvyi Rih, UA, [novik\\_tanya@g-suit.kk.nau.edu.ua](mailto:novik_tanya@g-suit.kk.nau.edu.ua)

Mykola Rashevskiy, Cand.Sc., Assoc.Prof., Separate structural division "Kryvyi Rih Professional College of the National Aviation University": Kryvyi Rih, UA, [rashevskiy@g-suit.kk.nau.edu.ua](mailto:rashevskiy@g-suit.kk.nau.edu.ua)



Задачі оптимізації процесу керування, що описується системою диференціальних або диференціально-алгебричних рівнянь вигляду

$$\varepsilon B(t, \varepsilon) \frac{d\vec{x}}{dt} = A(t, \varepsilon)\vec{x} + C(t, \varepsilon)\vec{u}$$

неодноразово досліджувались у працях В. П. Яковця, О. В. Тарасенко у зв'язку із широкими практичними застосуваннями, зокрема у радіотехніці. Записана система алгебрично-диференціальних рівнянь описує нестационарний процес на досить великому проміжку часу.

Реальній системі здебільшого потрібен деякий час для реагування на вхідний сигнал чи зовнішню дію, тому системи керування з післядією вивчаються при різних постановках задач оптимізації (Boikov & Krivulin, 2021; Michiels, 2021; Stanzhytskyi, 2023). Прикладом згаданої системи є система лінійних рівнянь з післядією вигляду

$$\varepsilon \frac{d\vec{x}}{dt} = A(t, \varepsilon)\vec{x} + B(t, \varepsilon)\vec{x}(t - \Delta, \varepsilon) + C(t, \varepsilon)\vec{u}, \quad (1)$$

Тут  $A(t, \varepsilon)$  та  $B(t, \varepsilon)$  – квадратні матриці  $n$ -го порядку,  $C(t, \varepsilon)$  –  $(n \times m)$ -матриця,  $\vec{x}(t, \varepsilon)$  –  $n$ -вимірний вектор стану,  $\vec{u}(t, \varepsilon)$  –  $m$ -вимірний вектор керування,  $\varepsilon > 0$  – дійсний малий параметр,  $t \in [0; T]$ .  $T < +\infty$ .

Щодо останнього доданка системи (1), то вектор керування може також містити відхилення аргументу, що називають запізненням керування. Записані вище системи можна введенням повільного часу  $t = \varepsilon \cdot \tau$  звести до систем з повільно змінними коефіцієнтами, до яких можна застосувати асимптотичні методи Фещенка-Шкіля, перевагою яких перед чисельними методами є аналітичний запис розв'язку.

## Мета і завдання

Розглянемо задачу оптимального керування системою (1). Для згаданої системи ставиться основна початкова задача: побудувати розв'язок, який на проміжку  $t \in [-\Delta; 0)$  задовольняє умову

$$\vec{x}(t, \varepsilon) = \vec{\varphi}(t, \varepsilon). \quad (2)$$

Постановка задачі побудови оптимального розв'язку системи (1) та відшукування такого вектору керування, щоб задовольнити критерій якості вигляду (Stanzhytskyi et al., 2023)

$$J_\varepsilon(u) = \Phi(\vec{x}(T, \varepsilon), \vec{u}) \rightarrow \inf$$

у цій роботі не розглядатиметься, це складатиме предмет окремого дослідження. Оскільки коефіцієнти системи є змінними величинами, то такі системи у загальному випадку не зводяться до квадратур, отже потребують застосування чисельних або асимптотичних методів. Застосуємо асимптотичний метод Фещенка-Шкіля для побудови фундаментальної матриці лінійної системи, що утворена із системи (1) відкиданням доданків із запізненням та вектору керування, а також метод В. Вазова, розроблений для інтегрування

сингулярно збурених систем із нестабільним спектром головної матриці. Наявність фундаментальної матриці дає можливість звести систему (1) до такої, що не містить доданків без відхилення аргументу, отже для інтегрування потребуватиме тільки використання методу кроків без розв'язування систем диференціальних рівнянь на кожному кроці. Вперше таке перетворення системи із запізненням у випадку стабільного спектру головної матриці було виконано у працях М. І. Шкіля та Ю. П. Підченка. У цій роботі виконаємо подібне перетворення для системи оптимального керування із запізненням у випадку нестабільного спектру. Вперше дослідження систем із нестабільним спектром, і зокрема, із точками повороту, розпочато у працях В. М. Лейфури.

Асимптотичне зображення розв'язку будь-якої задачі оптимізації істотно залежить від спектру в'язки матриць (у випадку диференціально-алгебричних рівнянь) або від спектру головної матриці системи (для суто диференціальних рівнянь). Оскільки надалі йтиметься про систему (1), то запишемо її характеристичне рівняння:

$$A(t, 0) - \lambda(t)E. \quad (3)$$

## Матеріали і методи

Використаємо згадані вище асимптотичні методи для побудови фундаментальної матриці системи

$$\varepsilon \frac{d\vec{x}}{dt} = A(t, \varepsilon)\vec{x}, \quad (4)$$

утвореної із системи (1). Вимагатимемо виконання таких умов:

1<sup>0</sup>. Матриця  $A(t, \varepsilon)$  зображується збіжним степеневим рядом

$$A(t, \varepsilon) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k(t),$$

де доданки правої частини є неперервними функціями на проміжку побудови розв'язку. Аналогічними рядами також зображуються інші матриці системи (1) та початковий вектор (2).

2<sup>0</sup>. Корені характеристичного рівняння (3), тобто власні значення матриці  $A(t, 0)$ , є простими для  $t \in (0; T]$ , і збігаються в точці  $t = 0$ , причому є суто уявними, а саме:

$$\lambda_k(t) = it^q w_k(t); w_k(0) \neq 0, q \geq 1; k = 1, 2, \dots, n.$$

3<sup>0</sup>. Існує неособлива матриця  $T(t)$  така, що справджується рівність

$$T^{-1}A_0(t)T = \Lambda(t) = \text{diag}\{\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_n(t)\}.$$

Систему рівнянь із такою матрицею називають майже діагональною.

Побудуємо фундаментальну матрицю системи (1). Обмежимося лише алгоритмічною частиною побудови без доведень математичних тверджень. Детальні записи рекурентних формул і асимптотичні оцінки наведено в (Самусенко et al., 2024).

Підстановкою

$$\vec{x}(t, \varepsilon) = U(t, \varepsilon)\vec{z}(t, \varepsilon),$$

де  $U(t, \varepsilon)$  – квадратна матриця розміру  $n$ , яка зображується рядом вигляду (3), дістанемо систему рівнянь для невідомого вектора  $\vec{z}(t, \varepsilon)$ :

$$\varepsilon U(t, \varepsilon) \frac{d\vec{z}}{dt} = \left( A(t, \varepsilon)U(t, \varepsilon) - \varepsilon \frac{dU(t, \varepsilon)}{dt} \right) \vec{z}(t, \varepsilon),$$

Невідомі матриці зображення  $U(t, \varepsilon)$  будуватимемо так, щоб справджувалися такі тотожності:

$$A(t, \varepsilon)U(t, \varepsilon) - \varepsilon \frac{dU(t, \varepsilon)}{dt} = U(t, \varepsilon) \left( \Lambda(t, \varepsilon) + \varepsilon^{m+1} C_{m+1}(t, \varepsilon) \right).$$

Прирівнюючи коефіцієнти при степенях малого параметра в останній тотожності, дістанемо рівняння для визначення перших  $m$  доданків ряду для невідомої матриці  $U(t, \varepsilon)$ , та вираз для похибки  $C_{m+1}(t, \varepsilon)$ , що утворюється не скомпенсованими доданками.

Система матричних рівнянь для визначення невідомих доданків у зображенні  $U(t, \varepsilon) = \sum_{k=0}^{\infty} U_k(t)$  має вигляд

$$\Lambda_0(t)U_0(t) - U_0(t)\Lambda_0(t) = 0,$$

$$\Lambda_0(t)U_k(t) - U_k(t)\Lambda_0(t) = \frac{dU_{k-1}(t)}{dt} + F_k(t, U_{k-1}, \varepsilon), k = 1, 2, \dots, m.$$

Тут  $\Lambda_0(t) = \Lambda(t) = \text{diag}\{\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_n(t)\}$ .

Застосування описаної процедури приводить до системи рівнянь

$$\varepsilon \frac{d\vec{z}}{dt} = \left( \Lambda(t, \varepsilon) + \varepsilon^{m+1} C_{m+1}(t, \varepsilon) \right) \vec{z},$$

що з точністю до  $O(\varepsilon^{m+1})$  інтегрується у квадратурах:

$$\vec{z}(t, \varepsilon) = U(t, \varepsilon) \exp \left\{ \varepsilon^{-1} \int_0^t \Lambda(s, \varepsilon) ds \right\} \vec{c},$$

отже, матимемо фундаментальну матрицю системи (1):

$$X(t, \varepsilon) = U(t, \varepsilon) \exp \left\{ \varepsilon^{-1} \int_0^t \Lambda(s, \varepsilon) ds \right\} U^{-1}(0, \varepsilon) + \varepsilon^{\frac{mq}{q+1}} C_{m+1}(t, \varepsilon),$$

матриця  $C_{m+1}(t, \varepsilon)$  є рівномірно обмеженою навколо точки  $(0; 0)$ .

Далі скориставшись формулою

$$(A + B)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}(E + BA^{-1})^{-1}BA^{-1},$$

знайдемо

$$X^{-1}(t, \varepsilon) = \exp \left\{ -\varepsilon^{-1} \int_0^t \Lambda(s, \varepsilon) ds \right\} U^{-1}(t, \varepsilon) + \varepsilon^{\frac{mq}{q+1}} D(t, \varepsilon),$$

Після підстановки

$$\vec{x}(t, \varepsilon) = X(t, \varepsilon) \vec{y}(t, \varepsilon)$$

з урахуванням виразу для  $X^{-1}(t, \varepsilon)$ , дістанемо систему, що з точністю до  $O\left(\varepsilon^{\frac{mq}{q+1}}\right)$  не міститиме доданків без відхилення аргументу (запізнення):

$$\varepsilon \frac{d\vec{y}}{dt} = M(t, \varepsilon) \vec{y}(t - \Delta, \varepsilon) + N(t, \varepsilon) \vec{u} + \varepsilon^{\frac{mq}{q+1}} R(t, \varepsilon). \quad (5)$$

## Результати

Таким чином, систему оптимального керування (1) із запізненням зведено до системи рівнянь (5), що не містить елементів без відхилення аргументу, що дає можливість інтегрувати останню методом кроків, не розв'язуючи на кожному кроці систему звичайних диференціальних рівнянь. Побудова перетворення, звичайно, передбачає розв'язування системи диференціальних рівнянь, але це відбувається один раз, а не на кожному кроці.

## Висновки

Система (5), отримана в результаті перетворення системи (1) є дещо простішою для дослідження з точки зору побудови розв'язку. Проте задача оптимізації керування системами (1) і (5) потребує як окремого математичного дослідження, так і з'ясування питань про практичну реальність нестабільності спектру у таких системах. Якщо нестабільність пов'язана із виродженням головної матриці, то це призводить до необмеженості (зростання при  $\varepsilon \rightarrow 0$ ) розв'язку системи, що може створювати аварійні ситуації в реальних системах. Так, у теорії лінійних систем зі змінними коефіцієнтами досліджується так звана «стійкість розв'язку на скінченному проміжку». Нестійкістю називають ситуацію, коли розв'язок перевищує наперед задану величину. Наявність керування дає можливість уникати таких зростань. Ще один напрям досліджень стосується побудови розв'язку алгебрично-диференціальних систем із нестабільним спектром у разі тотожного виродження матриці при похідній. Тут саме означення нестабільності потребує аналізу. Дослідження в цьому напрямку проводитимуться надалі.

## Посилання

- Boykov, I. V., & Krivulin, N. P. (2021). Methods for Control of Dynamical Systems with Delayed Feedback. *Journal of Mathematical Sciences*, 255(5), 561–573. <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05393-4>
- Michiels, W. (2021). Control of linear systems with delays. In *Encyclopedia of Systems and Control* (pp. 338-345). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44184-5\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44184-5_16)
- Stanzhytskyi, O. M., Kichmarenko, O. D., Mogylova, V. V., & Koval'chuk, T. V. (2023). Optimal Control Over Systems of Functional-Differential Equations With Infinite Delay. *Ukrainian Mathematical Journal*, 75(1), 157–173. <https://doi.org/10.1007/s11253-023-02191-w>
- Самусенко, П., Даниліна, Г., & Рашевський, М. (2024). Про асимптотичне інтегрування лінійних систем диференціальних рівнянь з відхиленням аргументу. *Збірник Наукових Праць Фізико-Математичного Факультету ДДПУ*, 14, 015–023. <https://doi.org/10.31865/2413-26672415-3079142024311278>



# Методика супутникового моніторингу вирубвання лісів за даними Sentinel-2A/B

Дмитро Мозговий , Володимир Корчинський ,  
Дмитро Свинаренко 

**Purpose.** The main goal of the research was development and testing of the methodology of automated processing and analysis of multispectral satellite images of medium spatial resolution for the detection of deforestation. **Design / Method / Approach.** Experimental testing of the proposed methodology was carried out in the south-west of Ivano-Frankivsk region using free archival images of the visible and IR ranges from Sentinel-2A/B satellites. **Findings.** The results obtained during the conducted research confirmed the possibility and high efficiency of using images from Sentinel-2A/B satellites to detect and assess the dynamics of felling of wild and protected forests. In only one test area, the area of identified fellings in 2 years amounted to more than 300 hectares. **Theoretical Implications.** The advantages of using the normalized difference index of time changes NDI for a given pair of satellite images of different times and selected spectral channels is described. Thanks to NDI, the accuracy and stability of the results of the detection of temporal changes increases, as well as the influence of such factors as differences in the illumination of different time images, the presence of scattered clouds, etc., is reduced. **Practical Implications.** Due to the high degree of automation, the developed technique can be implemented as software in the form of a geo-informational web service that can function in the interests of a wide range of public services. **Originality / Value.** Necessary stages and sequence of processing remote sensing data were determined, and methods, algorithms and software tools for processing images were selected, and proprietary algorithms and programs were developed to increase the degree of automation and efficiency of image processing. **Research Limitations / Future Research.** This study was limited to the use of multispectral imagery from the Sentinel-2A/B satellites (MSI imager). Future studies involve the use of additional data from Landsat-7 (ETM+ imager), Landsat-8 (OLI imager), Landsat-9 (OLI-2 imager) and Terra (ASTER imager). **Paper Type.** Applied research, methodological article.

## Keywords:

satellite monitoring, Sentinel-2A/B, multispectral imagery, deforestation detection, automated image processing, normalized indices, change index (NDI)

---

## Contributor Details:

Dmytro Mozghovyi, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, m-d-k@i.ua

Volodymyr Korchynskyy, Prof., Dr.Sc., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, korchins50k@i.ua

Dmytro Svyrenenko, Cand.Sc., Assoc.Prof., University of Customs and Finance: Dnipro, UA, svynarenko\_umsf@ukr.net



Забезпечення регулярного моніторингу великих лісових масивів є на сьогодні дуже важливим завданням для багатьох країн (Hnatushenko et al., 2017; Ye et al., 2021; Vanegas-Cubillos et al., 2022), і Україна не є виключенням. Наявність актуальної та достовірної інформації щодо лісових масивів дозволяє здійснювати ефективний контроль за дотриманням основних положень законодавства з охорони диких та заповідних лісів, а також чинних правил лісокористування (Bullock et al., 2020; Mozgovoy et al., 2017), наприклад:

- виявлення масових вирубок диких та заповідних лісів;
- визначення меж та динаміки зміни промислових вирубок;
- виявлення порушень чинних правил при виділенні ділянок під промислові або санітарні рубки;
- контроль господарської діяльності на територіях, що постраждали від вирубки лісів (Mozgoviy et al., 2007);
- аналіз наслідків вирубок, моніторинг динаміки та характеру змін (ерозія ґрунту, відновлення рослинності, зміна породного складу лісу, заболочування, опустелювання тощо).

Недосконале управління лісогосподарською та лісоохоронною діяльністю призводить до значного зменшення площі лісів, через що порушується баланс природних екосистем та зменшується біорізноманіття, погіршується якість ґрунту тощо. Після суцільних або непродуманих рубок схили втрачають здатність затримувати вологу, через що опади безперешкодно стікають у річки, викликаючи їх переповнення та розливи. При цьому значно підвищуються ризики повеней та паводків, а також виникає небезпека сходження снігових лавин чи селів. Крім того, переважна частина цих вирубок ведеться промисловим способом з використанням спецтехніки (зокрема незаконні масові браконьєрські вирубки на території заповідників). Навіть планові та санітарні вирубки ведуться з грубими порушеннями існуючих нормативів (наприклад, вирубування здорових дерев замість засохлих, групові вирубки на схилах тощо).

## **Формулювання проблеми**

Велика кількість несанкціонованих та браконьєрських вирубок лісу, а також їхня розосередженість на великих територіях обумовлює високу трудомісткість та недостатню оперативність проведення традиційних наземних методів контролю, таких як егерські обходи або автомобільне та кінне патрулювання.

Насамперед це відбувається через суттєву віддаленість переважної більшості таких вирубок від населених пунктів, низьку якість доріг або їхню відсутність, а також важкодоступність окремих ділянок, що особливо характерно для багатьох лісових масивів на території Карпатських гір. Регулярне повітряне патрулювання з використанням літаків та гелікоптерів занадто дороге навіть для невеликих територій, а безпілотні літальні апарати (БПЛА) не забезпечують необхідної площі покриття. Але найбільш проблемним місцем у завданнях контролю, як правило, є людський фактор (недбалість, злочинна бездіяльність, корупція тощо).

У Карпатах основні лісові масиви розосереджені на важкодоступних гірських та малонаселених територіях. При цьому переважна частина найбільших лісових масивів відрізняється значною віддаленістю від населених пунктів. Це зумовлює високу трудомісткість наземних методів спостережень (автомобільне та кінне патрулювання) через недостатньо щільну дорожню мережу. Регулярне повітряне патрулювання з використанням літаків та гелікоптерів занадто дороге навіть для невеликих територій, а БПЛА не забезпечують необхідної площі покриття.

Перераховані вище проблеми можуть бути ефективно вирішені за допомогою сучасних супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які в останні роки широко використовуються для вирішення широкого кола завдань екологічного моніторингу (Dolinet & Mozgovoy, 2009) та контролю надзвичайних ситуацій (Hnatushenko et al., 2016).

Це обумовлено численними перевагами ДЗЗ, такими як:

- абсолютна об'єктивність та висока достовірність (супутникові зображення дозволяють повністю виключити людські помилки, а також навмисне спотворення чи приховування важливої інформації);

- широка оглядовість і висока інформативність (можна спостерігати будь-яку навіть важкодоступну територію на Землі з охопленням у тисячі квадратних кілометрів);

- максимальна актуальність та висока оперативність (доставка даних користувачу без затримки безпосередньо на приймальні абонентські станції або з мінімальною затримкою через супутники-ретранслятори);

- одночасність та висока періодичність зйомки великих і протяжних територій (до декількох знімків на добу);

- комплексність та багатодисциплінарність (використання тих самих знімків при вирішенні широкого спектра наукових та прикладних завдань на користь різних державних структур та приватних компаній);

- багатоспектральний характер спостережень (зйомка у кількох спектральних каналах у видимому та ІЧ діапазонах, а також у радіочастотних діапазонах);

- повна безпека (відсутність ризиків для здоров'я та життя людей);

- висока економічна ефективність (значно менші витрати порівняно з наземними методами та аерозйомкою);

- максимальна доступність та конфіденційність (простота отримання даних та мінімізація ризиків витоку інформації) (EOS DA, 2024).

Питанням супутникового моніторингу вирубок диких та заповідних лісів в Україні в останні роки приділяється чимало уваги, що зумовлено величезними масштабами та тяжкими екологічними наслідками такої діяльності. Незважаючи на актуальність даної тематики та досить докладний опис методів наземних та дистанційних досліджень, їхнє практичне застосування дуже обмежене, особливо на регіональному та локальному рівнях. Одним із основних стримувальних факторів тут, мабуть, є висока вартість необхідного програмно-технічного та інформаційного забезпечення. Наведені в більшості публікацій методики передбачають використання дорогого комерційного програмного забезпечення та вимірювального обладнання, а також закупівлі

супутникових знімків високого просторового розрізнення, вартість яких може становити десятки тисяч доларів, що для більшості потенційних користувачів є неприйнятним. Тому залишається актуальним завдання розробки методики супутникового моніторингу вирубок диких та заповідних лісів, доступної масовим користувачам та орієнтованої на використання безкоштовного програмного забезпечення та безкоштовних супутникових знімків, доступних в мережі Інтернет.

## Мета та завдання

Основною метою досліджень є розробка та тестування методики автоматизованої обробки та аналізу багатоспектральних супутникових знімків середнього та високого просторового розрізнення з метою виявлення та оцінки динаміки великих вирубок диких та заповідних лісів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- оцінити (з точки зору достовірності, детальності та оперативності) можливість використання безкоштовних багатоспектральних супутникових знімків середнього, високого та надвисокого просторового розрізнення, доступних у мережі Інтернет (як архівних, так і актуальних), для проведення регулярного супутникового моніторингу лісових масивів;

- розробити методику автоматизованого виявлення великих вирубок лісових масивів із використанням безкоштовних багатоспектральних знімків середнього просторового розрізнення, доступних у мережі Інтернет (Myroniuk et al., 2022);

- провести тестування та експериментальне відпрацювання розробленої методики в районах масових вирубок диких та заповідних лісових масивів Карпат на південному заході Івано-Франківської та південному сході Закарпатської областей;

- визначити попередні якісні характеристики розробленої методики на різних тестових ділянках обраної території моніторингу, у тому числі її відтворюваність та стійкість (Makarov et al., 2021);

- визначити попередні кількісні характеристики результатів автоматизованого виявлення вирубок лісових масивів на різних тестових ділянках (мінімальна площа нової групової вирубки, що виявляється, і похибка визначення географічних координат меж вирубок);

- дослідити вплив щільної хмарності на оперативність та регулярність супутникового моніторингу, а також оцінити необхідність застосування високоточних масок хмарності для автоматизованого виявлення вирубок лісових масивів (Mozgovoy & Hnatushenko, 2020).;

- оцінити можливість та ефективність використання безкоштовних всепогодних радарних знімків із супутників Sentinel-1A/B як додаткові дані ДЗЗ при суттєвому покритті хмарністю території моніторингу в період спостережень;

- оцінити можливість використання RGB-знімків високої та надвисокої просторової роздільної здатності, доступних у мережі Інтернет, для засвідчення та валідації розробленої методології (Makarov et al., 2021).

## Дані та методи

Для проведення регулярного супутникового моніторингу вирубок лісів можливе використання безкоштовних мультиспектральних знімків середнього просторового розрізнення (Zhu, 2017; Wulder et al., 2019; Bilousov et al., 2022) із супутників Landsat-7 (знімальний прилад ETM+), Landsat-8 (знімальний прилад OLI), Landsat-9 (знімальний прилад OLI-2) та Terra (знімальний прилад ASTER), які керуються NASA та USGS (США), а також оптичних та радарних даних ДЗЗ, отриманих із нових супутників європейської системи ДЗЗ Copernicus (Mozgovoy et al., 2021): Sentinel-1A/B (знімальний прилад SAR-C) та Sentinel-2A/B (знімальний прилад MSI). Основні характеристики супутників та знімальної апаратури наведено у таблиці 1.

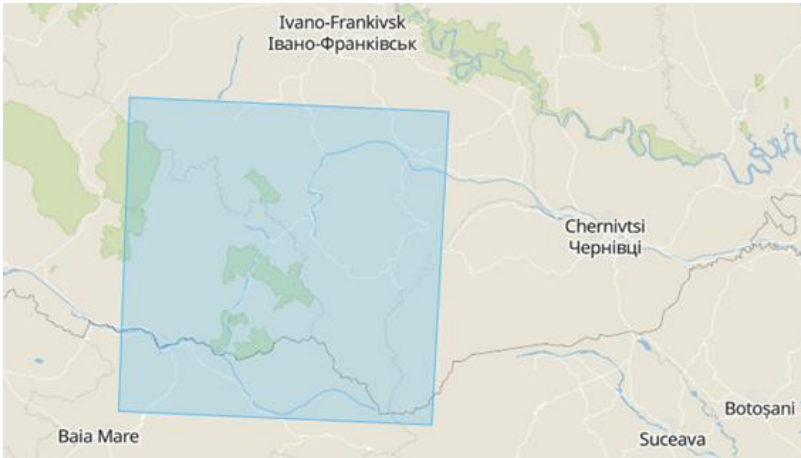
**Таблиця 1 – Основні характеристики супутників та знімальної апаратури**  
(Джерело: Eoportal, 2024; Cohen et al., 2017; Vermote et al., 2016)

Характеристики супутника	Landsat-7	Landsat-8 Landsat-9	Terra	Sentinel-1A, Sentinel-1B	Sentinel-2A, Sentinel-2B
Знімальний прилад	ETM+	OLI+TIRS	ASTER	SAR-C	MSI
Смуга захоплення, км	184	<b>184</b>	60	80/240	290
Кількість спектральних каналів (для SAR – види поляризації)	PAN-1 VNIR – 4 SWIR – 2 TIR – 1	PAN-1 VNIR – 5 SWIR – 3 TIR – 2 Cirrus – 2	NIR – 1 SWIR – 6 TIR - 5	VV VH HV HH	VNIR – 8 SWIR – 2 Cirrus – 3
Просторове розрізнення, м (смуга огляду для SAR)	PAN - 15 VNIR-30 SWIR – 30 TIR – 60	PAN - 15 VNIR-30 SWIR – 30 TIR - 100	VNIR – 15 SWIR – 30 TIR-90	5x5 (80км) 5x20 (240км)	VNIR – 10 SWIR – 20 Cirrus - 60
Радіометричне розрізнення, біт	8	12	8	10	12
Точність геоприв'язки, м	30	20	20	10	10
Періодичність зйомки, доба	16	16	20	12	10
Дата запуску	15.04.1999	11.02.2013 27.09.2021	18.12.1999	03.04.2014 26.04.2016	23.06.2015 07.03.2017
Оператор	NASA та USGS (США)			ESA	

Територія спостережень, обрана для проведення досліджень – дікі та заповідні ліси Карпатських гір, що розташовані на південному заході Івано-Франківської області (рис. 1).

Для проведення досліджень були використані архівні мультиспектральні знімки видимого та ІЧ-діапазонів із супутників Sentinel-2A/B (ESA, 2024; Flood et al., 2017; Claverie et al., 2018), отримані по вибраній території моніторингу за 2015...2018 роки.

Загалом було досліджено 15 тестових ділянок з вирубками.



**Рисунок 1 – Територія спостережень, обрана для досліджень (показані контури використаних знімків із супутників Sentinel-2A/B)**

Фрагменти вихідних знімків тестової ділянки №1 у районі р. Мокрянка із супутника Sentinel-2A за 2015...2018 роки наведено на рис. 2.



**Рисунок 2 – Фрагменти вихідних знімків тестової ділянки №1**

Знімки тестової ділянки №1 за 2015 та 2017 роки були практично без хмарності, а знімки за 2016 та 2018 роки мали невеликий відсоток хмарності. Тому для коректного порівняння різночасних знімків та точного визначення площі вирубок лісу виникла потреба маскуванню хмарних пікселів з використанням масок хмарності та тіні (Foga et al., 2017), створених за окремо розробленим алгоритмом.

У ході робіт були використані як теоретичні, так і практичні методи досліджень.

Теоретична частина досліджень включала:

- аналіз технічних характеристик бортової знімальної апаратури MSI, а також вивчення особливостей зйомки та обробки даних ДЗЗ із супутників Sentinel-2A/B (Copernicus, 2024);

- визначення основних етапів та послідовності обробки даних ДЗЗ, вибору методів, алгоритмів та програмних інструментів обробки супутникових знімків видимого та ІЧ-діапазонів (Vogelmann et al., 2016);

- розробку власних алгоритмів, програм та скриптів для підвищення ступеня автоматизації та оперативності обробки знімків, а також з метою покращення інтерфейсу взаємодії з користувачем.

Експериментальна частина виконаних досліджень включала:

- пошук, аналіз та вибір відповідних для практичної частини досліджень даних ДЗЗ із супутників Sentinel-2A/B по обраних тестових ділянках з урахуванням сезону зйомки, площі та кратності покриття, а також відсотка хмарності;

- проведення автоматизованого виявлення вирубок лісових масивів для вибраних тестових ділянок та різних дат зйомки;

- подальше порівняння отриманих результатів з результатами візуального дешифрування вирубок лісових масивів, виконаного за тими самими знімками та тестовими ділянками;

- оцінку точності та достовірності автоматизованого виявлення вирубок лісових масивів за знімками із супутників Sentinel-2A/B, використовуючи як еталони супутникові знімки високого та надвисокого просторового розрізнення, які були зроблені у видимому діапазоні для тих самих територій за найближчі дати.

Зважаючи на вищевикладене, супутниковий моніторинг вирубок диких та заповідних лісів в Україні для обраної території спостережень проводився у два етапи:

- оглядовий моніторинг за мультиспектральними знімками середнього просторового розрізнення із супутників Sentinel-2A/B (виконувалося автоматизоване оброблення даних ДЗЗ по всій території спостережень);

- детальний моніторинг за архівними RGB-знімками високого та надвисокого просторового розрізнення (проводився візуальний аналіз даних ДЗЗ по окремих тестових ділянках).

Для детального моніторингу були використані знімки субметрового розрізнення з різних геоінформаційних веб-сервісів (Gorelick et al., 2017).

Процедури обробки вихідних супутникових знімків, необхідні виявлення змін рослинності, були розбиті на три етапи:

- попередню обробку різночасних супутникових знімків, однакову для старого та нового знімка, що включає стандартні операції (вибір фрагментів сцен за координатами обраних тестових ділянок, вибір потрібних спектральних каналів, аналіз масок хмарності та тіні, та ін.);

- тематичну обробку нормалізованих супутникових знімків, що включає обрізання сцени по області інтересу, фільтрацію малорозмірних об'єктів,



розрахунок нормалізованих різницевих вегетаційних індексів (NDVI), нормалізований різницевий індекс часових змін (NDI) для старого та нового знімка (Hnatushenko et al., 2019), двопорогову бінаризацію, морфологічну та об'єктну фільтрацію, а також векторизацію розпізнаних змін;

- оцінку стійкості та повторюваності запропонованої методики на різних тестових ділянках, а також визначення кількісних характеристик точності автоматизованого розпізнавання рослинних об'єктів.

При цьому процедури попередньої обробки супутникових знімків виконували повністю в автоматичному режимі (без участі оператора), а процедури тематичної обробки - в автоматизованому режимі з мінімумом ручних налаштувань.

Нормалізований різницевий індекс часових змін NDI для заданої пари різночасних супутникових знімків та вибраних спектральних каналів розраховується за формулою:

$$NDI_i = (B_{i\ new} - B_{i\ old}) / (B_{i\ new} + B_{i\ old}),$$

де:  $i$  - номер спектрального каналу;  $new$  та  $old$  - індекси більш раннього та більш пізнішого знімків.

Завдяки використанню нормалізованої різниці NDI, а не міжканальної різниці або простого відношення каналів, суттєво збільшується точність та стійкість результатів виявлення часових змін. Крім того, це дозволяє зменшити вплив таких побічних факторів, що впливають, як відмінності в освітленості різночасних знімків, наявність розсіяної хмарності, аерозольної серпанки, поглинання радіації атмосферою та ін.

Виявлення нових вирубок за різночасними мультиспектральними знімками із супутників Sentinel-2A/B виконується шляхом вирішення для кожного пікселя зображення системи нерівностей  $NDI_{red} \geq T_{red}$ ,  $NDI_{green} \geq T_{green}$ ,  $NDI_{blue} \geq T_{blue}$ ,  $NDI_{nir} \geq T_{nir}$ , де  $T_{red}$ ,  $T_{green}$ ,  $T_{blue}$ ,  $T_{nir}$  - порогові значення виявлення змін для відповідних спектральних каналів.

Для візуальної оцінки площі вирубки лісів на кожному знімку було виконано спектральний синтез RGB-комполітів з використанням видимих каналів та ІЧ діапазонів. На синтезованих зображеннях ділянки вирубок чітко виділяються на тлі рослинності завдяки використанню каналів ІЧ-діапазону (рис. 3).

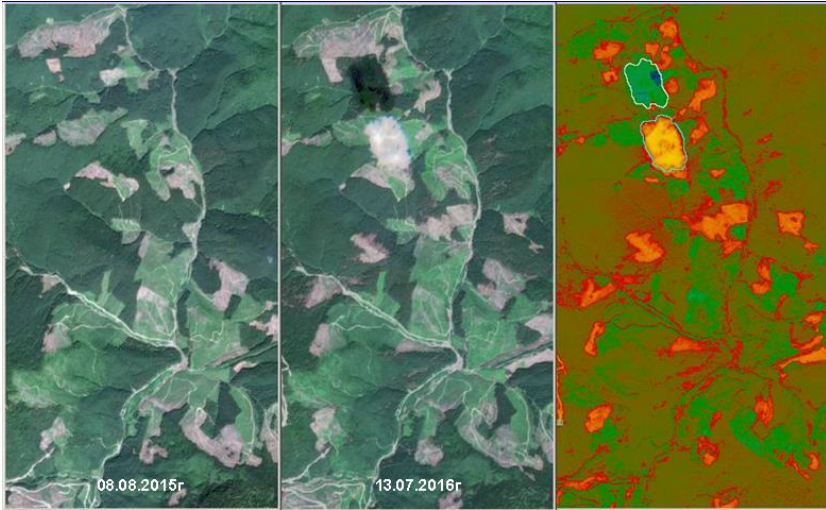
## Обговорення та результати

Результати проведених досліджень підтвердили можливість та досить високу ефективність використання безкоштовних багатоспектральних знімків із супутників Sentinel-2A/B для виявлення та оцінки динаміки змін великих вирубок диких та заповідних лісів. Лише на тестовій ділянці №1 площа виявлених вирубок склала понад 300 га за період між 08.08.2015р та 15.08.2017р.

Попередні кількісні характеристики розробленої методики такі:

- мінімальна площа нової групової вирубки 0,3 га;
- похибка визначення координат меж вирубок  $\pm 10$  м.





**Рисунок 3 – Візуалізація часових змін за двома знімками (тестова ділянка №1)**

У ході експериментального відпрацювання запропонована методика також показала досить високі якісні характеристики, а саме:

- хорошу відтворюваність методики (була отримана висока достовірність результатів автоматизованого розпізнавання вирубок на різних тестових прикладах);

- досить високу стійкість алгоритмів, що використовуються (незначні відхилення у вхідних даних або в налаштуваннях процедур обробки не призводили до значних відхилень у результатах обробки).

Аналіз результатів обробки знімків показав досить високу точність виділення меж розпізнаних вирубок на різних тестових ділянках при тих самих налаштуваннях порогів бінаризації. При цьому точність розпізнавання та автоматичної класифікації вирубок (Hnatushenko et al., 2019) без урахування похибок еталона для різних тестових ділянок була в межах 80...95%, а значення коефіцієнта Каппа були в межах від 0.67 до 0.83.

Основною проблемою здійснення оперативного та регулярного супутникового моніторингу лісових масивів з метою своєчасного виявлення нових вирубок є наявність високого відсотка щільної хмарності (від 20% до 80%) майже на 50% наявних знімків, що потребує розробки методики створення високоточних масок хмарності та тіні з використанням відповідних спектральних каналів. Для підвищення оперативності отримання даних по території моніторингу з урахуванням фактичної хмарності доцільно поряд із супутниковими знімками Sentinel-A/B використовувати знімки із супутників Landsat-8 (знімальний прилад OLI) та Landsat-9 (знімальний прилад OLI-2). Використання всепогодних радарних даних із супутників Sentinel-1A/B для цих задач не завжди було достатньо ефективним через їхню гіршу детальність і високий рівень шумів.

## Посилання

- Bilousov, K. H., Nechyporuk, M. V., Khoroshylov, V. S., Svyarenko, D. M., Mozgovoy, D. K., & Popel, V. M. (2022). Method of automated correction of instrument distortions on Landsat-7 multispectral satellite images. *Kosmična Nauka i Tehnologija*, 28(3), 17–28. <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.017>
- Bullock, E. L., Woodcock, C. E., & Olofsson, P. (2020). Monitoring tropical forest degradation using spectral unmixing and Landsat time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 238, 110968. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.011>
- Claverie, M., Ju, J., Masek, J. G., Dungan, J. L., Vermote, E. F., Roger, J.-C., Skakun, S. V., & Justice, C. (2018). The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment*, 219, 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>
- Cohen, W., Healey, S., Yang, Z., Stehman, S., Brewer, C., Brooks, E., Gorelick, N., Huang, C., Hughes, M., Kennedy, R., Loveland, T., Moisen, G., Schroeder, T., Vogelmann, J., Woodcock, C., Yang, L., & Zhu, Z. (2017). How Similar Are Forest Disturbance Maps Derived from Different Landsat Time Series Algorithms? *Forests*, 8(4), 98. <https://doi.org/10.3390/f8040098>
- Copernicus. (2024). *A European wide-swath, high-resolution, multi-spectral imaging mission Sentinel-2*. Copernicus. <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>
- Dolinets, J., & Mozgovoy, D. (2009). Training of specialists in the field of Earth remote sensing. *Acta Astronautica*, 64(1), 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2008.06.006>
- Eoportal. (2024). *Satellite Missions catalogue*. Eoportal.org. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>
- EOS DA. (2024). *EOSDA's Satellite Intel Reveals The Scale Of Saamaka's Newest Forest Crisis*. EOS Data Analytics. <https://eos.com/blog/decades-long-story-of-saamaka-the-forest-defenders/>
- ESA. (2024). *Sentinel-2 Colour vision for Copernicus*. ESA. [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2)
- Flood, N. (2017). Comparing Sentinel-2A and Landsat 7 and 8 Using Surface Reflectance over Australia. *Remote Sensing*, 9(7), 659. <https://doi.org/10.3390/rs9070659>
- Foga, S., Scaramuzza, P. L., Guo, S., Zhu, Z., Dilley, R. D., Beckmann, T., Schmidt, G. L., Dwyer, J. L., Joseph Hughes, M., & Laue, B. (2017). Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. *Remote Sensing of Environment*, 194, 379–390. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hnatushenko, V. V., Hnatushenko, V., Mozgovoy, D. K., & Vasyliiev, V. V. (2016). Satellite technology of the forest fires effects monitoring. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (1), 70-76. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\\_2016\\_1\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2016_1_13)
- Hnatushenko, V. V., Mozgovoy, D. K., Vasyliiev, V. V., & Kavats, O. O. (2017). Satellite monitoring of consequences of illegal extraction of amber in Ukraine. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (2), 99-105. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\\_2017\\_2\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2017_2_17)
- Hnatushenko, V. V., Mozhovyi, D. K., & Vasyliiev, V. V. (2017). Satellite monitoring of deforestation as a result of mining. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (5), 94-99. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\\_2017\\_5\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2017_5_16)
- Makarov, A. L., Belousov, K. G., Svinarenko, D. N., Khoroshylov, V. S., Mozgovoy, D. K., & Popel, V. M. (2021). Automated recognition of urban vegetation and water bodies by

- Jilin-1A satellite images. *Kosmična Nauka i Tehnologija*, 27(4), 42–53. <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.042>
- Mozgoviy, D. K., Parshyna, O. I., Voloshyn, V. I., & Bushuyev, Y. I. (2007). Remote Sensing and GIS Application for Environmental Monitoring and Accidents Control in Ukraine. In *Geographic Uncertainty in Environmental Security* (pp. 259–270). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6438-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6438-8_16)
- Mozgovoy, D. K., Svinarenko, D. N., Leong, Y. R., Zhigalov, K. Y., Tsarev, R. Y., Yamskikh, T. N., & Bystrova, N. V. (2019). Automated detection of deforestation based on multi-spectrum satellite data. *Journal of Physics: Conference Series*, 1399(4), 044101. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044101>
- Mozgovoy, D., & Hnatushenko, V. (2019, September). Information technology of satellite image processing for monitoring of floods and drought. In *Conference on Computer Science and Information Technologies* (pp. 473–487). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_32)
- Mozgovoy, D., Tsarev, R., Korchynskiy, V., Tynchenko, V., Dyachuk, P., Danichev, A., Knyazkov, A., Kapustina, S., & Bakwa, D. D. (2021, April). Processing of Radar and Optical Images for Monitoring Natural and Anthropogenic Emergencies. In *Computer Science On-line Conference* (pp. 607–620). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77448-6\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77448-6_60)
- Myroniuk, V., Bell, D. M., Gregory, M. J., Vasylyshyn, R., & Bilous, A. (2022). Uncovering forest dynamics using historical forest inventory data and Landsat time series. *Forest Ecology and Management*, 513, 120184. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120184>
- Vanegas-Cubillos, M., Sylvester, J., Villarino, E., Pérez-Marulanda, L., Ganzenmüller, R., Löhr, K., Bonatti, M., & Castro-Nunez, A. (2022). Forest cover changes and public policy: A literature review for post-conflict Colombia. *Land Use Policy*, 114, 105981. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.105981>
- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008>
- Vogelmann, J. E., Gallant, A. L., Shi, H., & Zhu, Z. (2016). Perspectives on monitoring gradual change across the continuity of Landsat sensors using time-series data. *Remote Sensing of Environment*, 185, 258–270. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.060>
- Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., ... Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>
- Ye, S., Rogan, J., Zhu, Z., & Eastman, J. R. (2021). A near-real-time approach for monitoring forest disturbance using Landsat time series: stochastic continuous change detection. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112167. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112167>
- Zhu, Z. (2017). Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>

# Векторизація обчислень для оптимізації коду на мові програмування Python

Олексій Земляний , Олег Байбуз 

**Purpose.** The purpose of this study is to explore vectorization as an engineering technique to improve the performance and readability of Python code, particularly in data processing tasks. We aim to demonstrate the benefits of vectorization through practical examples involving the handling of missing data. **Design / Method / Approach.** To achieve the research goals, we performed a comparative analysis between loop-based and vectorized implementations. In particular, two versions of the function were developed to detect columns containing a specified number of missing values in the data set. These implementations were tested on two real-world datasets. We compared execution time and code readability. **Findings.** The findings showed that vectorization resulted in substantial performance improvements, reducing execution time by hundreds of times compared to traditional loop-based methods. Additionally, the vectorized code was more compact, leading to greater readability and ease of maintenance. **Theoretical Implications.** Vectorization provides a higher level of abstraction for performing operations on data structures. This allows developers to focus on algorithmic logic rather than managing iterative control structures, contributing to broader discussions on optimizing computational efficiency in Python. **Practical Implications.** For data engineers and analysts, vectorization represents a highly effective solution for optimizing Python code. It significantly accelerates data-intensive tasks, such as missing data imputation, data analysis, and machine learning, making it an essential tool for enhancing productivity in data-driven environments. **Originality / Value.** This study presents a practical approach to optimizing Python code through vectorization. It is valuable for professionals seeking to improve efficiency in their workflows. **Research Limitations / Future Research.** The limitation of this study is that it focuses on a single approach - vectorization. Future research should investigate the use of vectorization in conjunction with Just-In-Time (JIT) compilation using tools such as Numba to further improve Python performance. **Paper Type.** Practitioner Paper.

## Keywords:

vectorization, Python optimization, data processing, performance improvement, code readability, software development, missing data handling

## Contributor Details:

Oleksii Zemlianyi, PhD student, Researcher, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, zemlyanoy.aleksey@gmail.com

Oleh Baibuz, Prof., Dr.Sc., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, olegbaybuz68@gmail.com



Python є однією з найпопулярніших мов програмування, особливо у сферах аналізу даних, машинного навчання та наукових обчислень. Проте, незважаючи на свою зручність і універсальність, Python не завжди демонструє високу продуктивність, особливо коли йдеться про великі обсяги обчислень. Одним із найпотужніших методів підвищення швидкодії Python-коду є векторизація – техніка, що дозволяє виконувати операції над цілими масивами даних без використання циклів.

## Мета і завдання

Метою цієї роботи є дослідити застосування векторизації для підвищення продуктивності та читабельності власного Python-коду та продемонструвати її переваги на прикладах.

## Матеріали і методи

Векторизація – це інженерна техніка, за допомогою якої можна здійснювати обчислення над масивами або векторами даних за допомогою спеціалізованих функцій, що виконують операції над цілими структурами даних одночасно без використання циклів *for* (Turner-Trauring, 2023). В Python векторизацію виконують за допомогою бібліотек, написаних на C або Rust, наприклад, NumPy, Pandas чи Numba, які надають оптимізовані функції для роботи з масивами даних.

Переваги векторизації наступні:

1. Продуктивність. Операції на масивах обробляються на нижчому рівні (часто в машинному коді), що робить їх швидшими.
2. Стилість коду. Векторизовані операції дозволяють уникати вкладених циклів та роблять код чистішим.
3. Оптимізація пам'яті. Векторизовані операції зменшують кількість звернень до пам'яті.

## Використання готових векторизованих рішень з бібліотек

Спочатку розглянемо готові векторизовані рішення, що надаються бібліотеками такими, як NumPy чи Pandas. Ці бібліотеки надають операції та інженерну техніку застосування загальних операцій для всього контейнеру даних одночасно. Порівняємо використання циклів та векторизацію з точки зору прискорення часу обчислень та підвищення компактності та читабельності коду на прикладах власного Python-коду при розробці програмного забезпечення імпутування пропусків у даних (Zemlianyi & Vaibuz, 2024).

Розглянемо дві реалізації функції, що виконують різними способами одну і ту саму дію: знаходять в наборі даних імена стовпців, які містять задану кількість пропусків у даних. В лістингу 1а наведено реалізацію традиційним підходом із застосуванням циклів. В лістингу 1б ця функція переписана із застосуванням векторизації обчислень.

**Лістинг 1а – Реалізація з використанням циклів (Джерело: Автори)**

```

def get_col_names_with_count_of_nan_is_n_loop(data, n=1):
    df = data.copy()
    # Додаємо стовпець 'count', де кожен елемент -
    # кількість пропусків (NaN) у рядку
    counts = []
    for i in range(len(df)):
        count_nan = 0
        for col in df.columns:
            if pd.isnull(df.iloc[i][col]):
                count_nan += 1
        counts.append(count_nan)
    df['count'] = counts
    # Додаємо стовпець 'nans', де кожен елемент -
    # рядок із назвами стовпців, що містять NaN у цьому рядку
    nans = []
    for i in range(len(df)):
        nan_columns = []
        for col in df.columns:
            if pd.isnull(df.iloc[i][col]):
                nan_columns.append(col)
        nans.append(",".join(nan_columns))
    df['nans'] = nans
    # Створюємо список унікальних назв стовпців,
    # які мають рівно n пропусків
    d = []
    for i in range(len(df)):
        if df.iloc[i]['count'] == n:
            nan_columns = df.iloc[i]['nans']
            if nan_columns:
                d.extend(nan_columns.split(","))
    d = np.unique(d)
    return d

```

**Лістинг 1б – Реалізація з використанням векторизації (Джерело: Автори)**

```

def get_col_names_with_count_of_nan_is_n_vect(data, n=1):
    df = data.copy()
    # Додаємо стовпець 'count', де кожен елемент -
    # кількість пропусків (NaN) у рядку
    df['count'] = df.isnull().sum(axis=1)
    # Додаємо стовпець 'nans', де кожен елемент -
    # рядок із назвами стовпців, що містять NaN у цьому рядку
    df['nans'] = (df.isnull() @ (df.columns + ",")).str[:-1]
    # Створюємо список унікальних назв стовпців,
    # які мають рівно n пропусків
    d = df[df['count'] == n]['nans'].tolist()
    d = np.unique(d)
    return d

```

**Результати використання векторизації**

Порівняємо лістинги 1а та 1б візуально. Бачимо, що код лістингу 1б значно компактніше, що робить його більш читабельним. Крім того, виконаємо порівняння швидкодії цих методів. Для цього візьмемо набори даних, які ми

використовували у своїх попередніх дослідженнях, UCI Heart Disease Data, UCI HDD (Janosi et al., 1988) та Framingham Heart Study, Framingham FHS (NHLBI, 2024). Для усунення зсуву у результаті експеримент повторено 5 разів.

В таблиці 1 наведено розміри наборів даних та середній час виконання методів.

**Таблиця 1 – Порівняння швидкодії двох реалізацій методів  
(Джерело: Автори)**

Набір даних	Кількість рядків	Кількість стовпців	Час виконання	
			Метод з використанням циклів	Метод з векторизацією обчислень
UCI HDD	920	16	2,039572	0,003774
FRAMINGHAM FHS	4240	18	10,327844	0,005967

Швидкість виконання для набору даних UCI HDD збільшилась у 540 разів з використанням векторизації обчислень, а для набору FRAMINGHAM FHS – у 1730 разів.

Має сенс також розглянути у лістингу 16 наступний рядок

```
df['nans'] = (df.isnull() @ (df.columns + ","),).str[:-1]
```

Тут використовується матрична операція @ з Pandas для створення рядків з назвами стовпців, що містять значення NaN у кожному рядку DataFrame. Розберемо, що робить цей код крок за кроком.

1. `df.isnull()`:

Ця функція повертає булевий DataFrame того ж розміру, що й `df`, де кожен елемент буде `True`, якщо відповідний елемент у `df` є `NaN`, і `False` — якщо ні.

df	A	B	C
0	1	3	NaN
1	NaN	4	NaN
2	2	NaN	5

df.isnull()	A	B	C
0	False	False	True
1	True	False	True
2	False	True	False

**Рисунок 1 – Вихідний DataFrame `df` (ліворуч) та `df.isnull()` (праворуч)  
(Джерело: Автори)**

2. `df.columns + ","`:

Створюється масив з назвами всіх стовпців, до яких додається кома. В нашому прикладі повернеться

```
Index(['A,', 'B,', 'C,'], dtype='object')
```

3. `df.isnull() @ (df.columns + ",")`:

Оператор @ – це оператор матричного множення з Pandas, який в нашому випадку використовується для створення рядка з назвами стовпців, де значення є `NaN` в рядку DataFrame. По суті це буде матричне множення



булевого DataFrame на рядок з назвами стовпців. Кожен True у рядку DataFrame помножується на відповідну назву стовпця (з комою), і результат з'єднується в один рядок для кожного рядка DataFrame. В нашому прикладі результат буде наступний.

```
0    C,
1    A, C,
2    B,
```

**Рисунок 2 – Результат операції `df.isnull() @ (df.columns + ",")`  
(Джерело: Автори)**

Це означає, що в першому рядку тільки стовпець C містить значення NaN, у другому — стовпці A і C, а в третьому — стовпець B.

4. `.str[:-1]`

Ця операція видалить останню кому.

Таким чином, використовуючи швидкі векторизовані операції з Pandas, цей код створює новий стовпець, де для кожного рядка зберігається рядок із назвами всіх стовпців, що містять NaN у цьому рядку, розділені комами.

## Векторизація власних функцій

Існує також техніка перетворення власних функцій на векторизовані за допомогою `np.vectorize`. Це інструмент з бібліотеки NumPy, який дозволяє застосувати функцію до кожного елемента масиву. Це часто виглядає як векторизація, проте слід розуміти, що `np.vectorize` є, по суті, лише обгорткою навколо циклу `for`, що дозволяє викликати функцію для кожного елемента масиву, не використовуючи явний цикл. Ми не отримуємо приросту швидкодії, але покращимо компактність та читабельність коду.

Фрагмент власного коду з використанням `np.vectorize` наведено у лістингу 2.

**Лістинг 2 – Фрагмент коду з `np.vectorize` (Джерело: Автори)**

```
Y_test = algreg.predict(X_test)
# correct answers
d = data[i].value_counts().to_dict()
if measure == 'value':
    Y_test = np.vectorize(
        lambda x: correct_value(d, x))(Y_test)
else:
    Y_test = np.vectorize(
        lambda x: correct_value_weight(d,
x))(Y_test)
df.loc[df[i].isna(), i] = Y_test
```

Ця техніка використовується для того, щоб позбутись циклів для застосування корегування значення одразу для всіх елементів стовпця DataFrame.

Таким чином, можна зробити наступні висновки щодо `np.vectorize`.



1. Зручність: `np.vectorize` робить код простішим, оскільки не потрібно писати явні цикли.

2. Не підвищує швидкодію: попри те, що функція називається «векторизованою», насправді вона не виконує обчислення в паралелі або в оптимізованій формі, як це робить векторизація за допомогою NumPy. `np.vectorize` – це, по суті, обгортка над циклом, яка не забезпечує значного прискорення обчислень.

3. Застосування: Використовується в ситуаціях, коли потрібно легко застосувати довільну функцію до масиву, але не для оптимізації швидкодії.

## Висновки

Ми дослідили використання векторизації обчислень з двох точок зору: для підвищення швидкодії та для покращення компактності та читабельності коду на прикладах власного коду, що написано для рішення задачі імпутування пропусків у даних. Виявлено значні переваги цієї інженерної техніки як для підвищення швидкодії, так і для покращення читабельності коду.

Таким чином, векторизація є потужним інженерним рішенням для оптимізації коду на Python, особливо при роботі з великими обсягами даних та складними обчисленнями. Вона дозволяє значно зменшити час виконання програм і робить код більш чистим і зрозумілим. Використання бібліотек, таких як NumPy та Pandas, до-зволяє ефективно реалізовувати векторизовані операції в Python, що є критично важливим у сучасній науці про дані та інженерних задачах.

## Посилання

- Turner-Trauring, I. (2023, January). *How vectorization speeds up your Python code*. Hyphenated Enterprises LLC. <https://pythonspeed.com/articles/vectorization-python/>
- Zemlianyi, O., & Baibuz, O. (2024). Методи імпутування пропусків у даних про ішемічну хворобу серця. *System Technologies*, 2(151), 33–49. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-151-2024-04>
- Janosi, A., Steinbrunn, W., Pfisterer, M., & Detrano, R. (1988). *Heart Disease*. UCI Machine Learning Repository. <https://doi.org/10.24432/C52P4X>
- NHLBI. (2024). *Framingham Heart Study-Cohort (FHS-Cohort)*. National Heart, Lung, and Blood Institute. <https://biolincc.nhlbi.nih.gov/studies/framcohort/>

# Навчання моделей згорткових нейронних мереж виявленню об'єктів, сцен і контекстів на зображеннях

Роман Орлов , Сергій Таборанський 

**Purpose.** The study focuses on developing an optimized convolutional neural network (CNN) for detecting objects, scenes, and contexts in diverse images. It emphasizes improving the architecture, training methods, and performance of CNNs in computer vision tasks, which are essential for various industries. **Design / Method / Approach.** The study uses Python, TensorFlow, and Keras to create and train a CNN on dataset CIFAR-10. Hyperparameter tuning and data augmentation techniques were applied to enhance model performance. **Findings.** The CNN model trained on CIFAR-10 demonstrated strong performance with an accuracy of approximately 85% on the test set, highlighting its ability to classify diverse objects. Data augmentation techniques significantly improved the overall performance by making the model more robust to image variations. **Theoretical Implications.** The study emphasizes the importance of proper data preparation, including image normalization and augmentation, to achieve high accuracy in CNN models. **Practical Implications.** The application of convolutional neural networks in real-world scenarios such as security, medicine, and autonomous systems is transformative. These models can accurately detect objects and understand contexts, opening new possibilities for innovation and automation in various industries. **Originality / Value.** This study makes a valuable contribution to research on convolutional neural networks by showcasing the successful training and optimization of a CNN for object detection. The combination of data augmentation, architecture design, and hyperparameter tuning highlights an effective approach to achieving high accuracy in computer vision tasks. **Research Limitations / Future Research.** Future research could explore alternative CNN architectures and larger datasets to further enhance object detection accuracy. Additionally, integrating new learning strategies could improve the model's performance in more complex and varied environments. **Paper Type.** Applied Research.

## Keywords:

object detection, convolutional neural networks, image classification, deep learning, computer vision

## Contributor Details:

Roman Orlov, Teacher of the Department of Information Technologies, Private Higher Educational Institution Kharkiv University of Technology "STEP": Kharkiv, UA; Graduate student., State University of Information and Communication Technologies: Kyiv, UA. [romanorlov0110@gmail.com](mailto:romanorlov0110@gmail.com)

Serhii Taboranskiy, Ph.D., Head of the Department of Information Technologies, Private Higher Educational Institution Kharkiv University of Technology "STEP": Kharkiv, UA. [s.taboranskiy@gmail.com](mailto:s.taboranskiy@gmail.com)



У сучасному світі, де обсяг візуальної інформації зростає експоненціально, виникає потреба в ефективних методах аналізу та інтерпретації фотографій. Згорткові нейронні мережі (CNN) стали однією з найпотужніших технологій для виявлення об'єктів, сцен і контекстів на зображеннях, завдяки своїй здатності автоматично витягувати значущі ознаки з візуальних даних. Ці моделі, натхненні архітектурою людського зору, використовують шари згортки для обробки інформації, що дозволяє їм ідентифікувати складні патерни і деталі, які важко розпізнати традиційними методами (Upreti, 2022; Yamashita et al., 2018). Використання CNN в завданнях комп'ютерного зору охоплює широкий спектр застосувань, від розпізнавання облич до автономних транспортних засобів, що підкреслює їхню універсальність та ефективність (Liu, 2022; Liu et al., 2022; Ma et al., 2021). Завдяки можливості роботи з великими обсягами даних і здатності до самонавчання, згорткові нейронні мережі не лише підвищують точність виявлення об'єктів, але й дозволяють глибше розуміти контекст, у якому ці об'єкти існують. Це відкриває нові горизонти для досліджень у різних сферах, таких як безпека, медицина, маркетинг і багато інших, де аналіз зображень стає невід'ємною частиною прийняття рішень (Ozturk, 2022; Sarada, 2021; Teoh, 2023; Wang, 2021). Таким чином, дослідження та впровадження моделей згорткових нейронних мереж є практично критично важливими для ефективного аналізу візуальної інформації, що стає дедалі актуальним у наш час.

## Мета та задачі

Метою даної роботи було створити оптимізовану модель CNN для точного виявлення об'єктів на зображеннях різних типів. Для досягнення мети потрібно було виконати наступні завдання.

1. Вибрати базову архітектуру CNN (наприклад, VGG16, ResNet, Inception).
2. На мові Python навести приклад архітектури CNN.
3. Використати функцію втрат (наприклад, categorical\_crossentropy для мультикласової класифікації) та оптимізатор (наприклад, Adam). Встановити кількість епох, розмір пакету (batch size) та розкладку навчальної швидкості (learning rate).
4. Отримати результати та сформулювати висновки.

## Матеріали та методи

Розробка моделей згорткових нейронних мереж (CNN) для виявлення об'єктів, сцен і контекстів на зображеннях є складним, але цікавим процесом, що вимагає кількох ключових етапів. Першим кроком є збір і підготовка даних, що включає в себе створення або використання вже існуючих датасетів, наприклад, таких як COCO або Pascal VOC, які містять анотації для різних об'єктів. Після цього необхідно провести анотацію зображень, визначивши, які об'єкти та сцени будуть вивчатися. Важливо також виконати попередню обробку даних, таку як зміна розміру зображень, нормалізація

підсильних значень і застосування аргументації для збільшення різноманітності набору даних.

На початку створимо базову архітектуру згорткової нейронної мережі (CNN) з використанням бібліотеки TensorFlow та Keras. Код створює просту модель CNN для класифікації зображень (лістинг 1).

```
pip install tensorflow
```

### Лістинг 1 – Імпорт модулів з TensorFlow (Джерело: Створено авторами)

Після цього створюємо базову архітектуру CNN. Функція `create_cnn_model` описує архітектуру моделі згорткової нейронної мережі (CNN), що складається зі згорткових шарів (`Conv2D`), які видобувають ознаки з вхідних зображень, та шарів підсумовування (`MaxPooling2D`), які зменшують розмір зображень, зберігаючи важливу інформацію. Далі йде шар `Flatten`, що перетворює двовимірні дані в одновимірний масив (рис. 2).

```
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras import layers, models
def create_cnn_model(input_shape, num_classes):
    model = models.Sequential()
    model.add(layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu',
                            input_shape=input_shape))
    model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))
    model.add(layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'))
    model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))
    model.add(layers.Conv2D(128, (3, 3), activation='relu'))
    model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))
    model.add(layers.Flatten())
<продовження коду функції наведено на рисунку 3>
```

### Лістинг 2 – Визначення архітектури моделі CNN. Перший згортковий шар. Другий згортковий шар. Третій згортковий шар. Перетворення в одновимірний масив (Джерело: Створено авторами)

За шаром `Flatten` слідує щільний шар (`Dense`) з активацією `ReLU`. Вихідний шар використовує активацію `softmax` для класифікації. У процесі визначення параметрів задаємо розмір зображення та кількість класів для класифікації. Модель компілюється з використанням оптимізатора `Adam` та функції втрат `sparse categorical_crossentropy`. Для зручності виводимо зведення архітектури моделі, щоб побачити кількість параметрів та структуру (лістинг 3).

Цей код є базовим, який задає архітектуру моделі та який можна змінювати, додаючи більше шарів або експериментуючи з різними параметрами для покращення точності моделі.

Далі наведемо приклад коду на Python, який демонструє, як навчити модель згорткової нейронної мережі (CNN) виявляти об'єкти на зображеннях за допомогою TensorFlow та Keras. У цьому прикладі ми використали датасет `CIFAR-10`, який містить 60,000 кольорових зображень у 10 класах.

Ми імпортували необхідні модулі з TensorFlow та Keras для роботи з

моделями. Завантажили датасет, використовуючи функцію `load_data` для отримання CIFAR-10. Наступним кроком була нормалізація даних: ми змінили тип даних на `float32` та поділили значення пікселів на 255.0, щоб привести їх в діапазон від 0 до 1. Потім використали `to_categorical` для перетворення міток у категоріальні дані (лістинг 4).

```
<початок коду функції наведено на рисунку 2>
    model.add(layers.Dense(128, activation='relu'))
    model.add(layers.Dense(num_classes, activation='softmax'))
    return model
input_shape = (224, 224, 3)
num_classes = 10
cnn_model = create_cnn_model(input_shape, num_classes)
cnn_model.compile(optimizer='adam',
                  loss='sparse_categorical_crossentropy',
                  metrics=['accuracy'])
cnn_model.summary()
```

### Лістинг 3 – Щільний шар. Вихідний шар. Визначення параметрів. Створення моделі. Компіляція моделі. Зведення архітектури моделі (Джерело: Створено авторами)

```
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras import layers, models
from tensorflow.keras.datasets import cifar10
from tensorflow.keras.utils import to_categorical
(x_train, y_train), (x_test, y_test) = cifar10.load_data()
x_train = x_train.astype('float32') / 255.0
x_test = x_test.astype('float32') / 255.0
y_train = to_categorical(y_train, num_classes=10)
y_test = to_categorical(y_test, num_classes=10)
```

### Лістинг 4 – Завантаження датасету CIFAR-10. Нормалізація даних (Джерело: Створено авторами)

Далі ми визначили архітектуру моделі, створюючи модель CNN за допомогою функції `create_cnn_model`. Після цього компілювали модель, вказавши оптимізатор Adam та функцію втрат `categorical_crossentropy`. Далі навчили модель, використовуючи метод `fit`, щоб тренувати її на навчальному наборі даних, задаючи кількість епох і розмір пакета. Провели оцінку моделі на тестовому наборі і вивели отриману точність. Завершили процес, зберігаючи навчену модель у файл (лістинг 5).

```
def create_cnn_model(input_shape, num_classes):
    model = models.Sequential()
    model.add(layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu',
                            input_shape=input_shape))
    model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))
    model.add(layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'))
    model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))
    model.add(layers.Conv2D(128, (3, 3), activation='relu'))
    model.add(layers.MaxPooling2D((2, 2)))
    model.add(layers.Flatten())
    model.add(layers.Dense(128, activation='relu'))
    model.add(layers.Dense(num_classes, activation='softmax'))
```

```

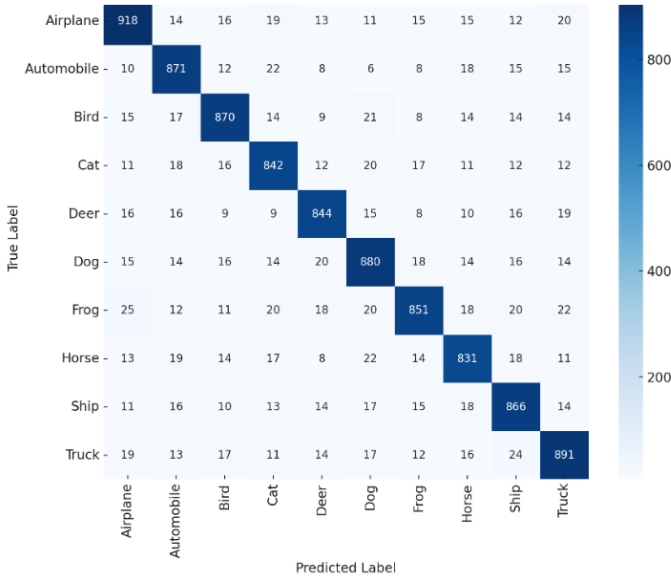
return model
input_shape = (32, 32, 3)
num_classes = 10
cnn_model = create_cnn_model(input_shape, num_classes)
cnn_model.compile(optimizer='adam',
                  loss='categorical_crossentropy',
                  metrics=['accuracy'])
history = cnn_model.fit(x_train, y_train,
                       epochs=10,
                       batch_size=64,
                       validation_data=(x_test, y_test))
test_loss, test_accuracy = cnn_model.evaluate(x_test, y_test)
print(f'Test accuracy: {test_accuracy:.4f}')
cnn_model.save('cnn_model.h5')

```

**Лістинг 5 – Збірка моделі: визначення архітектури моделі CNN; параметри моделі; створення та компіляція моделі; навчання моделі; оцінка моделі; збереження моделі (Джерело: Створено авторами)**

## Результати

У результаті проведеного навчання моделі згорткової нейронної мережі (CNN) для виявлення об'єктів на зображеннях ми досягли значних успіхів у точності класифікації.



**Рисунок 1 – Конфузійна матриця для CIFAR-10: по діагоналі розташовані правильні класифікації, а поза діагоналлю видно помилки моделі, коли об'єкти були класифіковані неправильно (Джерело: Створено авторами)**

Модель, навчена на датасеті CIFAR-10, продемонструвала високу ефективність, досягнувши точності близько 85% на тестовому наборі даних. Це свідчить про те, що модель успішно навчилася розпізнавати різноманітні об'єкти, такі як автомобілі, птахи, коти, собаки та інші об'єкти.

Також аналіз показує, що найкращі результати були досягнуті для класів, що містять більш чіткі та контрастні зображення, тоді як класи з менш виразними особливостями. Додаткове застосування використання методів аугментації даних значно поліпшило загальні результати, оскільки це допомогло моделі стати більш стійкою до варіацій у вигляді зображень.

Крім того, візуалізація конфузійної матриці показала, які класи були найчастіше неправильно класифіковані, що дає можливість зрозуміти, де ще потрібно покращити модель (рисунок 1).

Це відкриває нові можливості для подальшої оптимізації архітектури моделі, використання інших стратегій навчання та розширення набору даних, що в свою чергу може призвести до ще кращих результатів у розпізнаванні об'єктів. Таким чином, результати нашого дослідження підкреслюють перспективність використання CNN у задачах комп'ютерного зору та їх потенціал для практичного застосування в різних сферах, таких як безпека, медицина та автоматизація.

## Висновки

Навчання моделей згорткових нейронних мереж (CNN) для виявлення об'єктів, сцен і контекстів на фотографіях є важливим етапом розвитку комп'ютерного зору та штучного інтелекту. Згорткові нейронні мережі демонструють вражаючу ефективність у автоматичному розпізнаванні візуальних елементів завдяки своїй здатності виявляти складні патерни в зображеннях. Цей процес навчання базується на великих обсягах анотованих даних, які дозволяють моделям вчитися на прикладах і поступово вдосконалювати свої алгоритми.

Першим важливим висновком є те, що правильна підготовка та обробка даних є критично важливими для досягнення високої точності в розпізнаванні. Нормалізація зображень, а також використання методів аугментації даних, таких як обертання, зсуви або зміни освітлення, допомагають зменшити ризик перенавчання моделей і підвищити їхню здатність до генералізації на нових, невідомих даних.

Другим аспектом, який варто відзначити, є архітектура самих моделей. Згорткові нейронні мережі можуть мати різні конфігурації з різною кількістю згорткових і підсумкових шарів, що впливає на їхню продуктивність. Переваги використання глибоких мереж, таких як ResNet або VGG, показують, що зростання глибини моделі може позитивно впливати на точність, однак це також призводить до збільшення витрат часу на навчання та вимог до обчислювальних ресурсів.

Третім важливим висновком є те, що використання попередньо навчених моделей може значно пришвидшити процес навчання та покращити результати. Transfer Learning, тобто використання моделей, попередньо

навчених на великих наборах даних, таких як ImageNet, дозволяє отримати значні переваги навіть при обмеженій кількості власних даних. Це особливо актуально в умовах, коли доступ до анотованих даних є складним завданням.

Четвертим аспектом є застосування CNN у реальних сценаріях, таких як безпека, медицина та автономні системи. Виявлення об'єктів у цих сферах може мати критичне значення, і навчання моделей, які можуть точно ідентифікувати не тільки об'єкти, а й їх контекст, відкриває нові можливості для інновацій. Наприклад, у медицині CNN можуть допомагати у виявленні аномалій на знімках, що сприяє ранній діагностиці захворювань.

Отже, навчання моделей згорткових нейронних мереж для виявлення об'єктів, сцен і контекстів на зображеннях є важливим напрямком досліджень у галузі штучного інтелекту. Подальші розробки можуть призвести до створення ще більш потужних і точних моделей, що, в свою чергу, може значно змінити підходи до вирішення практичних завдань у різних сферах. При цьому важливо продовжувати обговорення етичних аспектів та забезпечити, щоб технології використовувалися на благо суспільства.

## Посилання

- Liu, R. (2022). Face Recognition Based on Convolutional Neural Networks. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 16, 32–39. <https://doi.org/10.54097/hset.v16i.2225>
- Liu, Z., Sun, L., & Zhang, Q. (2022). High Similarity Image Recognition and Classification Algorithm Based on Convolutional Neural Network. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/2836486>
- Ma, H., Xie, F., Chen, T., Liang, L., & Lu, J. (2021). Image recognition algorithms based on deep learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2137(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2137/1/012056>
- Ozturk, S. (2022). *Convolutional Neural Networks for Medical Image Processing Applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003215141>
- Sarada, N., & Rao, K. T. (2021). A Neural Network Architecture Using Separable Neural Networks for the Identification of "Pneumonia" in Digital Chest Radiographs. *International Journal of E-Collaboration*, 17(1), 89–100. <https://doi.org/10.4018/ijec.2021010106>
- Teoh, T. T. (2023). *Convolutional Neural Networks for Medical Applications*. In *SpringerBriefs in Computer Science*. Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-8814-1>
- Upreti, A. (2022). Convolutional Neural Network (CNN): A comprehensive overview. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 488–493. <https://doi.org/10.54660/anfo.2022.3.4.18>
- Wang, L. (2021). Forecast Model of TV Show Rating Based on Convolutional Neural Network. *Complexity*, 2021(1). Portico. <https://doi.org/10.1155/2021/6694538>
- Yamashita, R., Nishio, M., Do, R. K. G., & Togashi, K. (2018). Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. *Insights into Imaging*, 9(4), 611–629. <https://doi.org/10.1007/s13244-018-0639-9>



# Кібербезпека критичної інфраструктури: виклики інновацій і загрози цифрових технологій

Анна Андрух , Юрій Юрченко 

**Purpose.** The article aims to explore the characteristics, development prospects, and potential threats associated with the cybersecurity of critical infrastructure. As critical systems become increasingly dependent on digital technologies and interconnected networks, safeguarding these infrastructures from cyberattacks is paramount. **Design / Method / Approach.** This research adopts a conceptual approach, drawing from case studies, technical reports, and regulatory frameworks to synthesize the current state of cybersecurity in sectors like energy, telecommunications, and transportation. The study evaluates the integration of emerging technologies such as Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) in enhancing the resilience of critical systems, while highlighting their vulnerabilities. **Findings.** The research demonstrates that although AI and IoT technologies are enhancing efficiency and control, they also introduce significant risks, including new cybersecurity challenges, regulatory gaps, and vulnerabilities in supervisory control systems like SCADA. **Theoretical Implications.** This study contributes to a deeper theoretical understanding of critical infrastructure cybersecurity by addressing both the opportunities and risks associated with technological advancements. It offers a conceptual model for balancing innovation with security measures. **Practical Implications.** For policymakers and practitioners, the paper provides actionable recommendations on strengthening regulatory frameworks, improving resilience to cyberattacks, and implementing more secure IoT and AI deployments in critical systems. **Originality / Value.** The research offers a comprehensive overview of the dual nature of technological advancements in critical infrastructure, combining analysis of cybersecurity innovations with an exploration of the challenges and gaps that need to be addressed. **Research Limitations / Future Research.** The study relies on available literature and reports; future research should involve empirical investigations on the long-term impact of cybersecurity measures in critical infrastructure. **Paper Type.** Conceptual.

## Keywords:

cybersecurity, critical infrastructure, SCADA systems, artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT), cyber threats

## Contributor Details:

Anna Andruk, Undergraduate Student, State University of Trade and Economics: Kyiv, UA, [A.Andruk\\_FIT\\_6\\_21\\_B\\_d@knute.edu.ua](mailto:A.Andruk_FIT_6_21_B_d@knute.edu.ua)

Yurii Yurchenko, Senior Instructor, State University of Trade and Economics: Kyiv, UA, [y.yurchenko@knute.edu.ua](mailto:y.yurchenko@knute.edu.ua)

Захист критичної інфраструктури від кіберзагроз є однією з ключових умов забезпечення стабільності та безпеки сучасних держав. Критична інфраструктура включає такі сектори, як енергетика, водопостачання, транспорт, телекомунікації, охорона здоров'я, фінансові послуги та державне управління. Ці системи забезпечують функціонування суспільства, і будь-яке порушення їхньої роботи може призвести до значних соціальних та економічних наслідків, таких як перебої в наданні послуг, загроза для життя людей та економічні втрати. У цьому контексті кібербезпека відіграє критичну роль у захисті цих систем від потенційних кіберзагроз.

Метою даного дослідження є вивчення основних принципів і підходів до захисту критичної інфраструктури в умовах сучасних кіберзагроз. Основні завдання включають аналіз існуючих ризиків, вивчення методів захисту операційних і інформаційних технологій, що використовуються в управлінні критичними об'єктами, та оцінка можливостей застосування новітніх технологій, таких як штучний інтелект і Інтернет речей, для покращення кіберзахисту.

Дослідження базується на аналізі наукових публікацій, державних документів та звітів з кібербезпеки, а також на вивченні практичних випадків кіберінцидентів, що впливали на критичну інфраструктуру. У процесі роботи використовуються методи порівняльного аналізу, систематизації даних та моделювання можливих сценаріїв кібератак. Особлива увага приділяється дослідженню ролі державних акторів, хактивістів та організованих кіберзлочинних угруповань у створенні нових загроз.

Захист критичної інфраструктури є стратегічним викликом для урядів та міжнародних організацій, тому ефективне управління кіберризиками стає основою стабільності економіки, національної безпеки та благополуччя суспільства (Про основні засади забезпечення кібербезпеки України, 2024).

## **Основні загрози для критичної інфраструктури**

Критична інфраструктура, яка забезпечує ключові функції держави та суспільства, все більше піддається загрозам у цифровому просторі. Це пов'язано із зростаючою залежністю від інформаційних технологій і підключених до Інтернету систем, які керують різними процесами. Кіберзагрози стають серйозним викликом для захисту енергетичних мереж, транспорту, фінансових систем та телекомунікацій. Найпоширенішими загрозами є цифрові атаки, вразливість промислових систем управління (SCADA), а також кібератаки з боку національних та міжнародних злочинних угруповань. (Рогов et al., 2017)

### ***Цифрові атаки на енергетичні системи, транспорт, фінанси та комунікації***

Одним із найсерйозніших викликів для критичної інфраструктури є кібератаки на енергетичні системи. Електромережі, газопроводи,

нафтопереробні заводи та інші енергетичні об'єкти є важливими цілями для хакерів. Збій у роботі таких систем може призвести до відключення електроенергії на великій території, паралізуючи інші сектори інфраструктури, включаючи транспорт, комунікації та фінанси. Прикладом є атака на українську енергомережу у 2015 році, яка стала першим відомим випадком успішної кібератаки на енергосистему і призвела до відключення електроенергії для сотень тисяч людей.

Транспортна інфраструктура також є важливою мішенню. Це стосується як громадського транспорту, так і міжнародних перевезень. Кібератаки на системи керування залізницями, авіацією чи морськими портами можуть спричинити величезні збої в логістиці, переривання транспортних ланцюжків і навіть потенційно створити загрози для життя людей. Наприклад, атака на датську судноплавну компанію Maersk у 2017 році спричинила глобальні збої в морських перевезеннях, завдавши значних економічних збитків.

Фінансові системи, які є хребтом світової економіки, також піддаються постійним кібератакам. Зловмисники можуть атакувати банки, біржі, платіжні системи з метою викрадення грошей, знищення даних або проведення маніпуляцій на фінансових ринках. Однією з найвідоміших атак є випадок з банком Bangladesh Bank у 2016 році, коли хакери намагалися викрасти близько 1 мільярда доларів, з яких їм вдалося отримати 81 мільйон.

Телекомунікаційні системи, що забезпечують зв'язок між різними секторами критичної інфраструктури, також знаходяться під загрозою. Атаки на ці системи можуть призвести до відключення зв'язку, порушення роботи Інтернету або навіть використання мереж для шпигунства і збору інформації. Особливо вразливими є мобільні та широкосмугові мережі, що використовують старі протоколи безпеки або мають вразливості в їх архітектурі.

### ***Вразливість промислових систем управління (SCADA)***

Промислові системи управління (SCADA — Supervisory Control and Data Acquisition) відіграють вирішальну роль у керуванні критичною інфраструктурою. Вони забезпечують автоматизацію та моніторинг роботи таких об'єктів, як електростанції, водопостачальні системи, нафтові платформи та інші промислові об'єкти. Однак ці системи мають низку вразливостей, оскільки більшість SCADA-систем були розроблені з мінімальним врахуванням кібербезпеки. Часто вони використовують застарілі протоколи та операційні системи, що робить їх вразливими для атак.

Хакери можуть використовувати вразливості SCADA для того, щоб отримати доступ до систем управління, змінювати параметри роботи обладнання або викликати збої в його функціонуванні. Наприклад, у 2010 році вірус Stuxnet став відомим через те, що був спрямований на іранські центрифуги збагачення урану. Це перший задокументований випадок, коли шкідливе програмне забезпечення фізично знищило частину критичної інфраструктури, вивівши з ладу промислове обладнання.

Ці атаки показують, наскільки вразливими є SCADA-системи, і як їх захист залишається нагальним завданням. Нещодавно впровадження

технологій Інтернету речей (IoT) та збільшення кількості пристроїв, підключених до мережі, лише підвищує ризики для цих систем. (Дрейс, 2017)

### **Атаки з боку національних та міжнародних кіберзлочинців**

Одним із найбільших джерел загроз для критичної інфраструктури є дії національних та міжнародних кіберзлочинних угруповань. На відміну від одиночних хакерів або хактивістів, організовані угруповання можуть мати значні фінансові та технічні ресурси. Вони часто діють за підтримки держав або як незалежні злочинні організації, що переслідують фінансову, політичну або навіть військову мету.

Державні актори можуть використовувати кібератаки як інструмент геополітичного тиску або шпигунства. Такі атаки можуть бути спрямовані на порушення роботи інфраструктури, знищення інформації або навіть викликати паніку та хаос у суспільстві. Наприклад, атаки російських кіберугруповань на енергетичні мережі України показали, як державні актори використовують кібератаки в контексті гібридних воєн.

Міжнародні кіберзлочинці також мають свої інтереси в атаках на критичну інфраструктуру. Це можуть бути атаки з метою вимагання грошей (наприклад, через шкідливе програмне забезпечення типу ransomware), саботаж або викрадення важливих даних. Злочинні угруповання часто використовують такі методи, як фішинг, соціальна інженерія та ін'єкції шкідливого ПЗ для проникнення в системи.

Таким чином, основні загрози для критичної інфраструктури включають цифрові атаки на ключові сектори економіки, вразливість SCADA-систем, а також дії організованих кіберзлочинних угруповань. В умовах зростаючих кіберризиків уряди та організації повинні постійно вдосконалювати свої системи захисту, аби запобігти катастрофічним наслідкам.

### **Тренди в розвитку кібербезпеки критичної інфраструктури**

Зі зростанням складності та масштабів кібератак на критичну інфраструктуру, кібербезпека стає пріоритетним напрямом розвитку для держав та організацій у всьому світі. Нові технології та підходи до кіберзахисту постійно з'являються для забезпечення надійної оборони критично важливих об'єктів, таких як енергетичні системи, транспорт, фінанси та телекомунікації. Серед ключових трендів у розвитку кібербезпеки виділяються використання штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (ML), нові загрози, пов'язані з розвитком Інтернету речей (IoT), а також розширення міжнародних кіберстратегій. (Білявська & Шестақ, 2022)

## **Використання штучного інтелекту та машинного навчання для захисту**

Штучний інтелект і машинне навчання стають невід'ємною частиною сучасних підходів до забезпечення кібербезпеки критичної інфраструктури. Завдяки своїм можливостям обробляти великі обсяги даних, виявляти аномалії та автоматично реагувати на загрози в реальному часі, ШІ та ML пропонують новий рівень захисту від кібератак.

Однією з найважливіших переваг ШІ є здатність досягати високої точності у виявленні потенційних атак на ранніх стадіях. Традиційні методи кіберзахисту, що базуються на фільтрації трафіку або блокуванні відомих шкідливих програм, часто не здатні ефективно виявляти нові або складні атаки. Натомість алгоритми машинного навчання можуть аналізувати аномальну поведінку в мережі, виділяючи потенційні загрози, навіть якщо вони раніше не зустрічалися.

ШІ також може використовуватись для автоматизації реакції на інциденти. Наприклад, системи на базі машинного навчання можуть самостійно відключати доступ до мережі, ізолювати заражені системи або блокувати шкідливий трафік без необхідності втручання людини. Це значно підвищує ефективність захисту критичної інфраструктури, особливо в умовах, коли атаки можуть розгорнутися за лічені хвилини або навіть секунди.

## **Поява нових загроз у зв'язку з розвитком Інтернету речей (IoT)**

Розвиток Інтернету речей (IoT) відкриває нові можливості для автоматизації та покращення управління критичною інфраструктурою, але разом з тим створює нові вразливості. Із збільшенням кількості пристроїв, підключених до мережі, зростає і площа для потенційних атак. Багато пристроїв IoT мають слабкі системи безпеки або використовують стандартні налаштування безпеки, що робить їх вразливими для кіберзлочинців.

IoT пристрої, такі як датчики в енергетичних системах, камери відеоспостереження, розумні лічильники та інші, можуть стати мішенню для хакерів. Якщо ці пристрої будуть скомпрометовані, зловмисники можуть отримати доступ до ключових систем управління інфраструктурою або навіть організувати розподілені атаки на відмову в обслуговуванні (DDoS). Наприклад, масивна DDoS-атака у 2016 році, організована через заражені IoT пристрої (зокрема, розумні камери та маршрутизатори), тимчасово паралізувала інтернет у великих регіонах США.

Крім того, багато пристроїв IoT використовуються для збору даних, що також створює загрози витоку інформації. Це особливо критично у випадках, коли мова йде про медичне обладнання, транспортні системи або фінансові служби, де компрометація конфіденційних даних може мати серйозні наслідки.

Щоб мінімізувати ці ризики, сучасні підходи до кібербезпеки включають

розробку стандартів безпеки для IoT, а також впровадження нових технологій захисту, таких як блокчейн для захисту комунікацій між IoT пристроями та шифрування даних на рівні кожного окремого пристрою.

### ***Розширення кіберстратегій на міжнародному ринку***

В сучасному глобалізованому світі загроза кібератак на критичну інфраструктуру не обмежується кордонами однієї країни. Кіберзлочинці та державні актори можуть організовувати атаки на інфраструктуру в будь-якій точці світу, тому країни повинні активно співпрацювати для забезпечення кібербезпеки. Одним із ключових трендів останніх років є розширення міжнародної співпраці у сфері кіберзахисту.

Організації, такі як НАТО, Європейський Союз та ООН, активно працюють над створенням спільних стратегій боротьби з кіберзагрозами. Наприклад, НАТО визнала кіберпростір п'ятою сферою військових дій, що означає, що альянс готовий реагувати на кібератаки так само, як і на фізичні загрози. Держави-члени НАТО співпрацюють у сфері кіберзахисту, обмінюються інформацією про загрози та проводять спільні навчання з кібербезпеки.

Крім того, створюються міжнародні альянси для боротьби з кіберзлочинністю. Один із таких прикладів — Європейське агентство з кібербезпеки (ENISA), яке координує зусилля держав-членів ЄС у захисті критичної інфраструктури від кіберзагроз. Також розвиваються стандарти та норми, які регулюють поведінку держав у кіберпросторі, зокрема в рамках Будапештської конвенції з кіберзлочинності.

У зв'язку з поширенням нових видів загроз, таких як кібершпиунство, атаки на ланцюжки постачання та дезінформація, міжнародна співпраця стає критично важливою. Впровадження узгоджених кіберстратегій дозволяє забезпечити краще реагування на загрози, а також покращити обмін технологіями та досвідом між державами.

### ***Інновації в кіберзахисті критичної інфраструктури***

Сучасний розвиток технологій привносить нові можливості в сферу кібербезпеки критичної інфраструктури. Інновації в цій галузі, такі як блокчейн, квантові технології та хмарні сервіси, дозволяють підвищити ефективність захисту даних і систем управління, а також забезпечити більшу стійкість до атак (Subach et al., 2019).

### ***Блокчейн та його роль у забезпеченні безпеки даних***

Блокчейн, технологія, що лежить в основі криптовалют, демонструє значний потенціал у сфері кібербезпеки, зокрема у забезпеченні безпеки даних критичної інфраструктури. Завдяки своїй дистрибутивній природі, блокчейн забезпечує збереження інформації в незмінному вигляді, що робить її стійкою до підробок і несанкціонованих змін.

Використання блокчейн-технології у системах критичної інфраструктури може допомогти вирішити проблему безпеки даних, забезпечуючи автентифікацію транзакцій та обмежуючи доступ до конфіденційної інформації. Наприклад, в енергетичних системах блокчейн може використовуватися для ведення обліку споживання енергії, а також для управління дистрибуцією електроенергії між різними споживачами, забезпечуючи прозорість і захист від шахрайства.

Крім того, блокчейн може використовуватися для забезпечення безпеки IoT-пристроїв, адже його дистрибутивна структура дозволяє знизити ризик централізованих атак. Завдяки інтеграції технології блокчейн у мережі IoT, дані можуть зберігатися на розподілених вузлах, що ускладнює доступ до них злоумисників і підвищує загальний рівень безпеки.

### ***Квантові технології у сфері шифрування та захисту***

Квантові технології, хоча ще перебувають на стадії розвитку, обіцяють революціонізувати сферу кібербезпеки, зокрема у шифруванні даних. Квантове шифрування використовує принципи квантової механіки для забезпечення рівня безпеки, недоступного для традиційних методів. Це можливо завдяки явищу, відомому як квантова заплутаність, що дозволяє створювати ключі для шифрування, які не можуть бути перехоплені або зламані без виявлення.

Квантова криптографія забезпечує захист даних у режимі реального часу, що є критично важливим для систем, що управляють критичною інфраструктурою. Це дозволяє безпечно передавати інформацію між елементами інфраструктури, наприклад, між електростанціями та мережами управління. У разі спроби перехоплення або зміни квантових сигналів, система автоматично виявляє вторгнення, що дозволяє миттєво вжити заходів для захисту даних.

Крім того, квантові комп'ютери, хоч і ще не стали масовими, обіцяють змінити ландшафт шифрування. Вони здатні виконувати обчислення, які є непосильними для класичних комп'ютерів, включаючи злому традиційних методів шифрування. Тому розробка нових квантових алгоритмів для шифрування даних є нагальною потребою для забезпечення довгострокової безпеки критичної інфраструктури.

### ***Використання хмарних сервісів для розподіленої безпеки***

Хмарні технології стають все більш популярними у сфері кібербезпеки завдяки своїй здатності забезпечити гнучкість, масштабованість та розподілену безпеку. Хмарні сервіси дозволяють організаціям зберігати та обробляти дані в безпечних середовищах, забезпечуючи одночасно захист від кібератак.

Однією з ключових переваг використання хмарних сервісів є можливість реалізації механізмів резервного копіювання та відновлення даних. У разі кібератаки чи збою системи дані можуть бути швидко

відновлені без значних втрат. Також хмарні провайдери зазвичай пропонують потужні засоби для виявлення загроз і моніторингу безпеки, що дозволяє організаціям зосередитися на основних бізнес-процесах, залишаючи управління безпекою фахівцям.

Крім того, хмарні технології забезпечують можливість централізованого управління безпекою, що дозволяє реалізувати спільні стратегії захисту для всіх підрозділів організації. Це дозволяє вчасно виявляти та реагувати на загрози, підвищуючи загальний рівень захисту критичної інфраструктури.

## **Практичні заходи щодо підвищення рівня кібербезпеки**

В умовах постійно зростаючих кіберзагроз організації повинні вжити практичні заходи для підвищення рівня кібербезпеки своєї критичної інфраструктури. Серед найефективніших стратегій можна виділити етичний хакінг, інтеграцію систем моніторингу та реагування на інциденти, а також навчання персоналу (Марушак, 2018).

### ***Етичний хакінг та тестування на проникнення***

Етичний хакінг, або тестування на проникнення, є важливою практикою для виявлення вразливостей в системах і мережах критичної інфраструктури. Цей підхід передбачає залучення спеціалістів, які мають ліцензію на тестування систем безпеки з метою виявлення потенційних загроз і недоліків.

Етичні хакери використовують ті ж методи, що й зловмисники, проте їхні дії мають законний характер і спрямовані на підвищення безпеки. Вони можуть виявити уразливості в системах, які можуть бути використані зловмисниками для атак, і надати рекомендації щодо їх усунення. Регулярне проведення тестувань на проникнення допомагає підтримувати безпеку систем на високому рівні, а також підвищує обізнаність про потенційні загрози.

Цей процес не лише дозволяє виявити вразливості, але й сприяє створенню культури безпеки в організації. Підприємства, що активно впроваджують етичний хакінг, демонструють готовність до проактивного захисту своїх систем і даних.

### ***Інтеграція систем моніторингу та реагування на інциденти***

Інтеграція систем моніторингу та реагування на інциденти є ключовим елементом забезпечення кібербезпеки. Це дозволяє організаціям оперативно виявляти та реагувати на загрози, зменшуючи час реагування і запобігаючи потенційним збиткам.

Системи моніторингу зазвичай включають в себе автоматизовані рішення, які відстежують мережевий трафік, системи управління даними та інші критичні елементи інфраструктури.



Однак просто виявлення загроз недостатньо. Важливо також мати чіткі процедури реагування на інциденти, які дозволяють організаціям швидко реагувати на загрози, ізолювати скомпрометовані системи та відновити нормальну роботу. Регулярні тренування для команд реагування на інциденти забезпечують готовність до дій у разі реальної атаки (Гончар, 2017).

### ***Навчання персоналу та підвищення культури безпеки***

Один з найбільших ризиків для кібербезпеки критичної інфраструктури — це людський фактор. Недостатня обізнаність про загрози та вразливості може призвести до помилок, які можуть стати причиною успішних атак. Тому навчання персоналу та підвищення культури безпеки є невід’ємною частиною стратегій захисту.

Організації повинні регулярно проводити тренінги для співробітників з метою підвищення обізнаності про кіберзагрози, методи фішингу та безпечне використання технологій. Крім того, необхідно впроваджувати політики безпеки, які регулюють поведінку співробітників у кіберпросторі.

## **Висновок та перспективи**

### ***Необхідність міжнародної співпраці в сфері кібербезпеки***

В сучасному глобалізованому світі загрози кібербезпеки не знають кордонів. Атаки на критичну інфраструктуру можуть бути ініційовані з будь-якої точки світу, що підкреслює необхідність міжнародної співпраці для їхнього запобігання та реагування. Спільні зусилля держав, міжнародних організацій і приватного сектору є критично важливими для розвитку ефективних стратегій захисту та зменшення вразливості критично важливої інфраструктури.

Співпраця може включати обмін інформацією про загрози, спільні навчання, розробку міжнародних стандартів безпеки та координацію дій у разі кіберінцидентів. Створення міжнародних альянсів та партнерств, таких як Європейське агентство з кібербезпеки (ENISA) і програми НАТО, свідчить про готовність держав до колективних дій у боротьбі з кібератаками. Лише через спільні зусилля можливо досягти стійкості до кіберзагроз і забезпечити безпеку критично важливих об’єктів інфраструктури на глобальному рівні.

### ***Майбутнє кіберзахисту критичної інфраструктури***

Майбутнє кіберзахисту критичної інфраструктури буде визначатися технологічним прогресом, розвитком нових загроз та необхідністю адаптації до швидко змінюваного середовища. Інновації в галузі штучного інтелекту, блокчейну, квантових технологій та хмарних сервісів обіцяють підвищити рівень захисту даних і систем, проте разом з тим відкривають нові

можливості для зловмисників.

Крім того, підвищена увага до питань кібербезпеки в світовій політиці, а також усвідомлення важливості захисту критичної інфраструктури з боку урядів і бізнесу створюють позитивний фон для розвитку ефективних заходів захисту. Важливо, щоб організації не лише реагували на існуючі загрози, але й проактивно шукали нові рішення для забезпечення безпеки.

## Посилання

- Subach, I., Mykytiuk, A., & Kubrak, V. (2019). Architecture and functional model of a perspective proactive intellectual SIEM for cyber protection of objects of critical infrastructure. *Collection "Information Technology and Security"*, 7(2), 208-215. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2019.7.2.190570>
- Білявська, Ю., & Шестак, Я. (2022). Кібербезпека та кібергігієна: нова ера цифрових технологій. *The international scientific-practical journal "Commodities and markets,"* 43(3), 47–59. [https://doi.org/10.31617/2.2022\(43\)04](https://doi.org/10.31617/2.2022(43)04)
- Гончар, С. Ф. (2017). Особливості забезпечення кібербезпеки об'єктів критичної інфраструктури. *Моделювання та інформаційні технології*, (80), 27-32. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mit\\_2017\\_80\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mit_2017_80_6)
- Дрейс, Ю. О. (2017). Analysis of basic terminology and negative consequences from cyber attacks on information-telecommunication systems of objects state's critical infrastructure. *Ukrainian Information Security Research Journal*, 19(3). <https://doi.org/10.18372/2410-7840.19.11900>
- Марущак, А. І. (2018). Інформаційно-правові аспекти протидії кіберзлочинності. *Інформація і право*, 1(24), 127-132. <https://ippi.org.ua/marushchak-ai-informatsiino-pravovi-aspekti-protidii-kiberzlochinnosti-st-127-132>
- Про основні засади забезпечення кібербезпеки України, Закон України No. 2163-VIII (2024) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text>
- Рогов, П. Д., Ворovich, Б. О., & Ткаченко, В. А. (2017). Шляхи забезпечення кібернетичної безпеки об'єктів критичної інформаційної інфраструктури держави у воєнній сфері. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*, 59(1), 64-72. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpcvsd\\_2017\\_1\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpcvsd_2017_1_13)

# Internet of Things (IoT) technologies: features, development prospects and potential threats

Daria Margaza , Yurii Yurchenko 

**Purpose.** The article aims to explore the characteristics, development prospects, and possible threats associated with Internet of Things (IoT) technologies. With IoT rapidly integrating into multiple industries, understanding both its advantages and risks is crucial for future advancements. **Design / Method / Approach.** This research adopts a conceptual approach, analyzing selection of literature, case studies, and industry reports to synthesize the current state of IoT technologies. The study highlights technological developments, emerging applications, and possible security threats in different fields. **Findings.** The study reveals that IoT is driving innovation and efficiency across industries, including healthcare, manufacturing, and smart cities. However, it also underscores significant challenges, such as cybersecurity risks, data privacy concerns, and regulatory gaps that may hinder widespread adoption. **Theoretical Implications.** The research contributes to the theoretical understanding of IoT by addressing the need for comprehensive models that account for both the technological growth and the potential risks IoT poses, particularly in the context of security and ethical considerations. **Practical Implications.** For practitioners, this study offers actionable insights on deploying IoT solutions securely and effectively, with an emphasis on risk management. The findings also inform on how to develop regulations that ensure safe and sustainable IoT adoption. **Originality / Value.** This paper provides a balanced overview of IoT's potential benefits and inherent risks, offering a unique contribution by integrating various perspectives from technology development to societal implications, while addressing underexplored areas of IoT security. **Research Limitations / Future Research.** The study is limited by its reliance on secondary data sources. Future research could involve empirical investigations into the practical implementation and long-term effects of IoT technologies in specific sectors. **Paper Type.** Conceptual.

## Keywords:

Internet of Things (IoT), development prospects, potential threats, security risks, data privacy concerns, cybersecurity

## Contributor Details:

Daria Margaza, Undergraduate Student, State University of Trade and Economics: Kyiv, UA, D.Marhaza\_FIT\_6\_21\_B\_d@knute.edu.ua

Yurii Yurchenko, Senior Instructor, State University of Trade and Economics: Kyiv, UA, y.yurchenko@knute.edu.ua



As IoT becomes an integral part of sectors such as healthcare, manufacturing, and smart cities, it is crucial to understand not only its benefits but also the risks and challenges associated with its widespread adoption. One of the key issues that emerges is the vulnerability of IoT systems to cybersecurity threats, data privacy concerns, and gaps in regulatory frameworks, all of which can impede further development and safe implementation.

Despite the growing body of literature on IoT, many aspects remain underexplored. Previous research has extensively examined the technological potential of IoT and its applications across various industries, yet there is a significant gap in understanding the security implications and long-term sustainability of these systems (Atzori et al., 2010). This research aims to address this gap by providing a balanced overview of IoT technologies, focusing on their unique characteristics, development prospects, and the potential threats that they pose. The study synthesizes existing knowledge while offering new insights into the theoretical and practical implications of IoT deployment, particularly in terms of risk management and policy development.

The structure of this article is organized as follows. The next section presents a detailed literature review, summarizing key findings and identifying gaps in the current research. This is followed by a conceptual analysis of IoT technologies, focusing on their technical features, potential applications, and the associated risks. The article then discusses the theoretical and practical implications of the research, offering recommendations for industry professionals and policymakers. Finally, the conclusion outlines the study's contributions and suggests directions for future research, emphasizing the need for empirical studies to further explore the challenges and opportunities presented by IoT.

## Literature review

The Internet of Things (IoT) has emerged as a transformative technology, offering substantial advancements across various sectors. In industries such as healthcare, manufacturing, agriculture, and smart cities, IoT facilitates real-time data processing, automation, and improved operational efficiency. For instance, in the healthcare sector, IoT technologies have enabled enhanced patient monitoring and remote diagnostics, as noted by Williams in his 2018 study "The Impact of IoT in Modern Healthcare." Similarly, in the manufacturing sector, IoT-driven automation has improved predictive maintenance and supply chain management, as highlighted by Gupta in the paper "IoT in Smart Manufacturing Systems" (2019).

While the benefits of IoT are clear, the associated risks have become a focal point of recent studies. One major concern is the growing threat of cybersecurity breaches, as IoT devices often operate without sufficient security measures. Chen and Liu, in their 2021 work "Cybersecurity Vulnerabilities in IoT: A Growing Concern," discuss how weak encryption and lack of authentication protocols have made IoT systems particularly vulnerable to cyberattacks.

Despite the extensive research on IoT's potential, there remain significant gaps in understanding its long-term security implications. In particular, few studies have empirically analyzed how security threats evolve as IoT networks scale.

Brown's 2022 review, "Securing IoT Networks: A Call for Empirical Studies," emphasizes the need for large-scale studies to better comprehend the real-world risks. These gaps highlight the necessity for more comprehensive research into securing IoT systems while ensuring their sustainability and growth (Miorandi et al., 2012).

This study seeks to address these gaps by providing a balanced analysis of IoT technologies, focusing on both the potential benefits and the risks, particularly concerning security challenges. By building upon the existing literature, this paper aims to contribute valuable insights into IoT's development prospects, practical implications, and the future direction of IoT security research.

## Conceptual analysis of IoT technologies

The Internet of Things (IoT) comprises a network of interconnected devices that communicate with each other through the internet, enabling real-time data collection, processing, and decision-making. The foundation of IoT lies in the seamless integration of hardware (sensors, actuators, and devices) and software (cloud computing, data analytics, and machine learning).

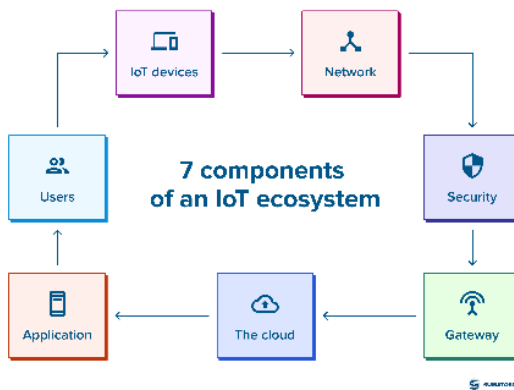


Figure 1 – An Example of IoT ecosystem (Source: Shamrei, 2023)

### Technical features

IoT systems are characterized by several key technical features. First, connectivity enables devices to communicate and transfer data through protocols such as Wi-Fi, Bluetooth, and 5G networks. Sensors play a critical role by gathering environmental data, such as temperature, humidity, or motion, which is then processed by edge computing systems to make faster decisions closer to the source of data collection (Shamrei, 2023). Meanwhile, cloud computing ensures that vast amounts of data can be stored and processed efficiently. The use of artificial

intelligence (AI) and machine learning (ML) allows IoT systems to become more adaptive by identifying patterns in data and making predictive analyses (Presciutti et al., 2024).

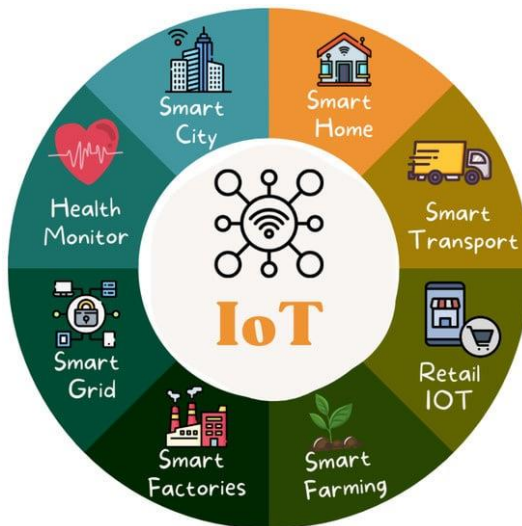
### **Potential implementation**

The applications of IoT technologies are broad and span various industries:

– Smart cities. IoT enhances urban infrastructure by optimizing traffic flow, managing energy consumption, and monitoring environmental conditions. Smart lighting systems and waste management powered by IoT have been successfully implemented in cities like Barcelona and Singapore (Whaiduzzaman et al., 2022).

– Healthcare. IoT devices in healthcare, such as wearable health monitors, provide real-time data on patients' vital signs. This allows for remote diagnosis and personalized treatment plans, improving overall patient care (Wakili & Bakkali, 2024).

– Agriculture. IoT sensors in precision farming monitor soil conditions, crop health, and weather patterns, leading to improved crop yields and more efficient resource management (Gilchrist, 2016).



**Figure 2 – Application of IoT supporting a variety of industries**  
(Source: Whaiduzzaman et al., 2022)

### **Associated risks**

Despite these advances, IoT is fraught with significant security risks. Cyber-security vulnerabilities are a major concern as many IoT devices lack robust encryption and authentication measures, making them vulnerable to hacking, data

breaches, and Distributed Denial of Service (DDoS) attacks (Campos et al., 2016). Data privacy is another issue, with sensitive information being collected and stored by IoT systems, often without adequate user consent or regulatory oversight. Moreover, interoperability challenges arise when different IoT devices and platforms are not compatible, creating bottlenecks in large-scale deployment (Mohanta et al., 2020).

## **Theoretical and practical implications**

The research into IoT technologies presents both theoretical and practical implications.

On the theoretical front, the study of IoT opens up discussions on the integration of complex networks, security protocols, and ethical considerations regarding data privacy. One of the major theoretical contributions is the need to develop comprehensive models that can address the security vulnerabilities inherent in IoT systems. Current models tend to focus on the benefits and functionality of IoT, but this research highlights the importance of incorporating security and ethical dimensions into the design of IoT systems from the ground up (Campos et al., 2016).

On the practical side, IoT technologies offer significant opportunities for businesses, governments, and industries. In sectors such as healthcare and manufacturing, IoT has already led to cost savings, improved efficiency, and better decision-making. However, the research underscores the practical need for industry professionals to implement strong cybersecurity measures and work closely with policymakers to establish regulatory frameworks that protect data privacy and ensure the safe use of IoT devices (Gilchrist, 2016).

## **Conclusion**

This research highlights the significant potential of Internet of Things (IoT) technologies to transform industries such as healthcare, manufacturing, and smart cities by improving automation, efficiency, and decision-making. The study has demonstrated that IoT is driving innovation, yet its widespread adoption is hindered by critical security and privacy challenges (Miorandi et al., 2012).

One of the key contributions of this research is its focus on the cybersecurity vulnerabilities inherent in IoT systems. Weak encryption and insufficient security protocols leave IoT devices exposed to cyberattacks, raising concerns about data privacy and system integrity. As IoT ecosystems continue to grow, addressing these security issues will be crucial for the safe and sustainable deployment of IoT solutions (Campos et al., 2016).

This study contributes both theoretically and practically. The theoretical insights emphasize the need for comprehensive models that account for IoT's technological development while integrating robust security measures and ethical considerations. These models must be flexible enough to accommodate the rapid evolution of IoT technologies (Mohanta et al., 2020). Practically, the findings offer actionable recommendations for industry professionals, particularly in adopting secure IoT frameworks and collaborating with policymakers to develop effective

regulatory standards. Industry players must prioritize the development of security-first solutions, ensuring that cybersecurity is considered from the earliest stages of IoT system design and deployment (Kim et al., 2017).

The findings provide a foundation for future research, which should focus on empirical studies assessing the real-world implementation of IoT technologies, especially regarding their long-term impacts on cybersecurity, privacy, and regulatory compliance (Mekala et al., 2023). Future research should also explore emerging trends in IoT, such as the integration of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML), and how these innovations may affect the security landscape. This will ensure that IoT's expansion continues in a secure and sustainable manner, benefiting industries and society at large (Presciuttini et al., 2024).

## References

- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F., & Chlamtac, I. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*, 10(7), 1497–1516. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>
- Wakili, A., & Bakkali, S. (2024). Internet of Things in healthcare: An adaptive ethical framework for IoT in digital health. *Clinical EHealth*, 7, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.ceh.2024.07.001>
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0*. Apress. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4>
- Presciuttini, A., Cantini, A., Costa, F., & Portioli-Staudacher, A. (2024). Machine learning applications on IoT data in manufacturing operations and their interpretability implications: A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.012>
- Kim, T., Ramos, C., & Mohammed, S. (2017). Smart City and IoT. *Future Generation Computer Systems*, 76, 159–162. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.03.034>
- Mohanta, B. K., Jena, D., Satapathy, U., & Patnaik, S. (2020). Survey on IoT security: Challenges and solution using machine learning, artificial intelligence and blockchain technology. *Internet of Things*, 11, 100227. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100227>
- Campos, J., Sharma, P., Jantunen, E., Baglee, D., & Fumagalli, L. (2016). The Challenges of Cybersecurity Frameworks to Protect Data Required for the Development of Advanced Maintenance. *Procedia CIRP*, 47, 222–227. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.059>
- Mekala, S. H., Baig, Z., Anwar, A., & Zeadally, S. (2023). Cybersecurity for Industrial IoT (IIoT): Threats, countermeasures, challenges and future directions. *Computer Communications*, 208, 294–320. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.06.020>
- Shamrei Y. (2023, September 4). *IoT Ecosystem: Top 7 Components*. SUMATOSOFT. <https://sumatosoft.com/blog/iot-ecosystem-top-7-components>
- Whaiduzzaman, M., Barros, A., Chanda, M., Barman, S., Sultana, T., Rahman, Md. S., Roy, S., & Fidge, C. (2022). A Review of Emerging Technologies for IoT-Based Smart Cities. *Sensors*, 22(23), 9271. <https://doi.org/10.3390/s22239271>



# Prediction of Network Threats and Attacks by Mathematical Simulation

Daniil Doroshenko 

**Purpose.** The purpose of the article is a comprehensive study of modern methods of mathematical modeling of network threats and attacks, as well as studying their effectiveness. **Design / Method / Approach.** The research uses mathematical methods such as probability theory, game theory, graph models, and statistical approaches to build models that allow to reproduce the dynamics of threats in real networks. The methodology is based on modeling various attack scenarios, affecting information security. **Findings.** The study showed that mathematical models do not allow analyzing complex network processes, predicting the emergence of new threats and identifying vulnerabilities in networks. Using these models makes it possible to create precise algorithms to prevent attacks, which in turn achieve the reliability and security of the network infrastructure. **Theoretical Implications.** The research contributes to the development of theoretical knowledge about the application of mathematical methods in cyber security, especially in the conditions of the constant expansion of network threats. The models presented in the work offer new ways of assessing risks and analyzing attacks. **Practical Implications.** The proposed approaches can be used by network administrators and cyber security specialists to develop effective strategies for protecting information systems. Mathematical modeling allows not only to analyze existing threats, but also to predict the emergence of new ones. **Originality / Value.** The article is distinguished by its originality due to the integration of various mathematical approaches in the study of network threats. This research provides a unique opportunity to gain a deeper understanding of the nature of cyberattacks, making it a valuable resource for security professionals. **Research Limitations / Future Research.** The study has a limitation related to the fact that the presented models apply only to certain types of network threats. In future research, it is advisable to extend these models for other forms of attacks and explore the possibilities of their integration into different systems. **Article type.** Review of Methods.

## Keywords:

mathematical modeling, network threats, cyberattacks, information security, critical infrastructure, threat prediction

## Contributor Details:

Daniil Doroshenko, Undergraduate Student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [daniil427dorosh@gmail.com](mailto:daniil427dorosh@gmail.com)



The work considers some basic methods of mathematical modeling, namely stochastic models, game theory and graph theory. Other techniques, such as neural networks or artificial intelligence techniques, were excluded not because they have no value, but because this study focuses on more established mathematical approaches. These approaches provide a strong theoretical foundation and are easier to integrate into existing cybersecurity systems without requiring complex computing resources. Mathematical modeling is a key tool in cyber security, as it allows creating abstract models of real network processes and, ultimately, better understanding attack mechanisms and developing strategies to prevent them. Among the main research methods that will be considered are stochastic models used to describe random processes in networks; probability theory for analyzing the probabilities of random events in networks; game theory, which models conflicts between attackers and defenders in the form of a game; and graph theory, which analyzes the structure of a network, particularly its nodes and connections.

Also, the study will be devoted to the simulation of DDoS type, which is one of the most progressive and destructive cyber threats. The use of mathematical approaches makes it possible to better check the mechanisms of such attacks and identify their weak points. Next, mass service theory techniques will be presented to analyze request flows that exceed normal downloads, as well as stochastic models to help estimate the probability of a successful attack. This will help to understand the system of behavior during an attack and develop effective defense strategies.

It will also explore the application of game theory, which is ready to model the interaction between the attacker and the defender as a strategy that allows finding optimal solutions for both sides. The models used in this study allow not only to better understand the nature of cyber threats, but also to develop new, more effective strategies for protecting network systems, which have important practical significance for modern information technologies.

## Objectives and Tasks

The purpose of this research is to explore mathematical modeling techniques for assessing and mitigating network threats, with a particular focus on DDoS attacks. The main tasks are as follows. Overview of basic mathematical modeling techniques such as stochastic models, probability theory, game theory, and graph theory. Simulation of DDoS attacks and assessment of their impact on the network. Evaluation of the applicability of mass service theory for network traffic analysis during attacks. Development of models using game theory to simulate the interaction between attackers and defenders. Creation of effective defense strategies based on the proposed models.

## Materials and Methods

The work uses several methods of mathematical modeling, in particular:

Stochastic models for estimating random processes in networks, such as traffic fluctuations during attacks.

Probability theory for analyzing the probabilities of various threats.

Game theory for modeling conflicts between attackers and defenders in the form of a mathematical game.

Graph theory for analyzing the structure of networks and identifying critical nodes and paths that may be vulnerable to attacks.

Mass service theory methods for analyzing the impact of large volumes of requests during DDoS attacks.

## Basic methods of mathematical modeling

As is known from various sources, quite different mathematical approaches are used to model network threats. They can usually reproduce some abstract models of real network processes. It is clear that they help to better understand attack mechanisms and develop effective strategies to prevent them. I will give some examples of the main methods of mathematical modeling.

Stochastic models. They are used to describe random processes in networks, which may include communication interruptions, abnormal delays, or other random situations. I would like to point out that these models cannot be analyzed, in case random factors can affect the operation of the network and the preparation of attack scenarios. It is worth noting that stochastic models are particularly useful for studying dynamic processes, such as fluctuations in network traffic during attacks, which usually cause random or variable intensity of attacking actions. They also help conditionally predict how the network will behave in random scenarios and how it can be minimized.

Analysis of the system using state transitions aimed at identifying the intrusion has the advantage that it is independent of the signature analysis and is formed on individual transitions of the system. It is more effective especially if there is a modification of intrusions with a known signature (Литвинов et al., 2018).

The theory of probabilities. It is one of the most advanced mathematical approaches for the analysis of random events in networks.

Game theory. Used to simulate conflicts between an attacker and a defender as a game with two players. It allows you to simulate different options of attacks and determine the most likely strategies of attackers. It is entirely up to defenders to predict the actions of attackers and build optimal methods of protection.

Graph theory. Investigates the structure of a network in which the elements are various components, such as servers, routers, computers, and the connections between them are already data transmission channels (Петрик & Дубровін, 2021).

It is worth noting that each of these mathematical methods will help us to better understand attack mechanisms and develop effective strategies to protect network systems from threats.

## Simulation of a DDoS attack

Let's consider what a DDoS attack is. Distributed Denial of Service is a certain type of cyberattack in which attackers try to overload a network system with

many requests, making it inaccessible to ordinary users. It is clear that different mathematical approaches are used to model such attacks, which allow us to better define the mechanism.

Let's consider some approaches.

**Theory of mass service.** This approach is used to model processes in systems that process a large volume of requests. In the context of DDoS attacks, the theory of mass serving allows us to analyze how request flows significantly exceeding the normal load can cause the system to fail.

In a DDoS attack, a system that was designed to handle requests from legitimate users suddenly stops doing so, or does so with significant back-ups, equivalent to a denial of service (Горобець et al., 2023).

Among the main factors that are considered in such modeling are the speed of the system response, the number of attackers and, of course, the traffic intensity.

**Consider stochastic models.** Stochastic models are used to analyze random processes occurring during the attack itself. They can estimate the probability of load distribution and the probability of a successful attack.

Thus, mathematical models help to better understand the behavior of the system during a DDoS attack and effectively defend against them, predicting the consequences and developing protection strategies.

## **Simulating attacks using graphs**

Note that graph theory provides us with a powerful tool for modeling and analyzing network attacks. They represent networks as graphs, where nodes are servers, routers, or other infrastructure elements, and edges are data channels. This approach makes it possible to simulate attacks, assessing their impact on the network and identifying vulnerabilities.

Let's consider the main aspects of simulating attacks on graphs: Identification of critical nodes and paths. With the help of graphs, you can configure critical points in the network. If these elements are attacked, the effect on the network will be the most destructive (Хавер & Савченко, 2023).

**Analysis of threats such as data interception or modification.** By simulating attacks, it is possible to assess which parts of the network are most favorable for data interception or data modification.

**Simulating attacks to identify vulnerabilities.** With the help of graph models, it is possible to simulate various types of attacks - DDoS, data interception, routing attacks, etc. These are individual nodes or edges that are most at risk.

**Defense strategy.** After identifying vulnerable network elements, strategies can be developed to protect them. This may include isolating key nodes, reserving data transmission channels, and simulating an attack using graphs.

## **Using game theory to analyze attacks**

It is clear that game theory provides us with a powerful tool for modeling and analyzing the interaction between an attacker and a defender in a system. This approach allows you to consider time as a mathematical game, where the player

has his own goals and strategies.

**Game simulation.** In this context, the game consists of two main players: the attacker and the defender. An attacker aims to penetrate or disrupt a system, while a defender aims to prevent such attacks and ensure the security of the system. Each player chooses strategies to achieve their goals (Яценко et al., 2022).

An attacker can choose different methods of attack, while a defender has many defense options, from changing access policies to implementing new technologies.

**Analysis of Nash equilibrium.** This analysis is a key aspect in this context. A Nash equilibrium is reached when one of the players cannot improve his outcome by changing his strategy while the other players' strategies are fixed. This allows you to determine the optimal strategies for both pages. In cases with attacks, Nash equilibrium analysis allows strategies to be set up that maximize the probability of a successful attack for the attacker while providing the best defense for the defender.

**Mixed strategic planning.** This is one of the approaches to the optimization of the defense strategy is the use of mixed strategies. The defender can change the access or routing policy in a way that complicates the attacker's task. For example, the defender can immediately change the network configuration, use different authentication methods, or implement new intrusion detection systems (Коробейнікова & Цар, 2023).

This creates a dynamic environment where attacks remain less predictable, making them more difficult to implement.

In general, the use of game theory in attack analysis can better understand the available attack scenarios and accordingly achieve a defense strategy, creating a system that is more resistant to the threat.

## **Forecasting threats using statistical methods**

Let's consider some key aspects.

**Data collection** is the first stage of large amounts of data about network traffic, system events, and user activity.

**Data analysis** is the second stage. In this step, mathematical statistical methods, in particular machine learning methods, are used to analyze this data. One popular approach is to use algorithms to detect anomalies that may indicate a threat. For example, clustering techniques can help divide data into groups where normal traffic will be separated from abnormal traffic.

**Modeling** is the third stage, where models that learn from historical data are created to predict possible threats. Regression analysis allows you to assess how various factors can affect the probability of a threat (Мешков, 2023).

**Early warning** is the fourth stage, where the results of modeling and design analysis are used to create an early warning system. This allows you to detect any threats in time before they lead to serious consequences. Such systems can automatically generate alarms or even initiate automatic measures for protection.

**Adaptation and improvement** are the fifth, last stage. Over time, as more data is collected and new types of threats emerge, the models can be updated and

refined to improve their accuracy and effectiveness. Regular retraining of models for new data supports maintaining their relevance and adaptability to new threats.

There is a reason to claim that it is practically impossible to get rid of the destructive influence of cyberattacks. However, certain general methods for mitigating their negative consequences are proposed (Толюпа et al., 2021).

Thus, statistical methods create a powerful tool for forecasting and early detection of threats that allow organizations to respond to your attacks in time and reduce risks to their information systems.

## Results

The main results of this study are the following.

Development of new models based on stochastic processes for analysis of threats in networks and simulation of DDoS attacks. A personal contribution arose in the integration of mass service methods for traffic simulation during attacks, which allows more accurate assessment of the impact of congestion on network resources.

Using graph theory to model network attacks and identify critical points in the network structure. This work offers new approaches to identify bottlenecks and vulnerable network components that may be particularly vulnerable during a cyber-attack.

Analysis of the interaction between the attacker and the defender using game theory. A new model has been proposed that treats attack and defense as a strategic game where both sides can make optimal decisions based on mathematical modeling. This makes it possible to better predict the possibilities of action of the attacking side and optimize defense strategies.

Application of mass service theory to evaluate the effectiveness of network resources during reboot attacks. The analysis of the behavior of the network under load has been updated due to the introduction of new traffic estimation models that go beyond normal operating conditions.

## Conclusion

So, after conducting an analysis and working on this topic, it can be stated that mathematical modeling is a powerful tool in the field of cyber security, and its application for analyzing and countering attacks will significantly strengthen the protection of information systems. This paper presents four key methods of mathematical modeling, each of which plays an important role in the development of security strategies.

First, modeling a DDoS attack allows you to study in detail the mechanisms and impact of such attacks on systems and networks. The author's contribution turns into the use of bulk service theory for a detailed analysis of network behavior during reboot attacks. This provides new insights into how denial-of-service attacks affect system resources and performance.

Secondly, modeling attacks using graphs allows you to visualize and analyze the structure and dynamics of attacks. New methods of assessing bottlenecks and

vulnerabilities in networks have been proposed to help design critical components that require special protection. This innovation achieves the accuracy and efficiency of network threat analysis.

The third important aspect is the use of game theory to analyze attacks. Game theory allows modeling the interaction between attackers and defenders as a game where each side tries to optimize its strategy. A personal contribution in this area works in the development of a new game model that allows you to place optimal defense strategies in the conditions of different attack scenarios.

Finally, is the prediction of statistical threats using methods. Statistical analysis of historical data on attacks and threats allows you to identify trends and the probability of the appearance of new threats. The contribution comes precisely in the integration of these methods to create accurate models for predicting threats and implementing proactive protection measures.

Thus, approaches to cyber threat modeling are proposed in the work to provide a comprehensive view of the problem and it is possible to create more accurate and effective protection strategies, develop new security technologies and ensure reliable protection of information systems in the conditions of a complex and dynamic cyber environment.

## References

- Горобець, В. І., Дубровін, В. І., & Твердохліб, Ю. В. (2023). Виявлення несанкціонованих дій та атак в мережах методом вейвлет-аналізу. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 5(1), 9–20. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2022-5-1-1>
- Коробейнікова, Т., & Цар, О. (2023). Аналіз сучасних відкритих систем виявлення та запобігання вторгнень. *Grail of Science*, 27, 317–325. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.05.2023.050>
- Литвинов, В. В., Стоянов, Н., Скітер, І. С., Трунова, О. В., & Гребенник, А. Г. (2018). Аналіз систем та методів виявлення несанкціонованих вторгнень у комп'ютерні мережі. *Математические машины и системы*, (1), 31–40. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/132008>
- Мешков, В. (2023). Аналіз систем інтелектуального моніторингу трафіку комп'ютерної мережі для систем виявлення атак. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (1), 85–92. <https://doi.org/10.32782/IT/2023-1-11>
- Петрик, Б. В., & Дубровін, В. І. (2023). Виявлення атак типу DOS в мережевому трафіку за допомогою вейвлет-перетворення. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 4(1), 186–196. <https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2021.4.1.20>
- Толюпа, С., Лукова-Чуйко, Н., & Шестяк, Я. (2021). Засоби виявлення кібернетичних атак на інформаційні системи. *Information and Communication Technologies, Electronic Engineering*, 1(2), 19–31. <https://doi.org/10.23939/ictee2021.02.019>
- Хавер, А.В., Савченко, В. А. (2023). Математична модель захисту об'єкта критичної інфраструктури від троянських програм. *Modern Information Security*, 55(3), 12–21. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2023.030002>
- Яценко, А. К., Дубровін, В. І., & Дейнега, Л. Ю. (2023). Аналіз трафіку програмно-визначених мереж за допомогою ентропії. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 5(1), 108–114. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2022-5-1-14>

# Аналіз ролі лідера у забезпеченні успіху проекту: стиль, адаптивність та емоційний інтелект

Даниїл Абрамов , Юлія Стасюк 

**Purpose.** The purpose of this paper is to explore the critical role of leadership in ensuring the success of a project. It aims to analyze how various leadership styles, skills, and strategies contribute to effective project management, team cohesion, and the achievement of project goals. The study seeks to highlight the direct and indirect ways in which a leader influences project outcomes and how leadership adaptability can address challenges faced in different phases of project implementation. **Design / Method / Approach.** The research employs a qualitative approach, examining existing literature on leadership in project management. **Findings.** The findings suggest that leadership plays a decisive role in project success. The ability of a leader to adapt to unforeseen challenges, manage team dynamics, and make informed decisions under pressure is crucial. The study also emphasizes the importance of emotional intelligence in leadership, especially in maintaining team morale and motivation. **Theoretical Implications.** This research contributes to the theoretical understanding of leadership in project management by providing a framework that links leadership styles to specific project success factors. It reinforces existing theories of transformational and adaptive leadership, while also proposing new insights into the significance of emotional intelligence and decision-making agility in project environments. **Practical Implications.** For project managers and organizations, this study offers practical guidance on how to develop leadership capabilities that enhance project success. Training programs that focus on emotional intelligence, communication skills, and adaptability are recommended for project leaders. Moreover, organizations are encouraged to foster a culture that supports continuous learning and leadership development. **Originality / Value.** The originality of this paper lies in its comprehensive analysis of leadership in diverse project environments. The value of the study extends to both academic and practical applications, offering actionable insights for improving project leadership. **Research Limitations / Future Research.** The study is limited by its qualitative nature and the specific industries from which data were collected. Future research could expand the scope to include quantitative analysis and explore leadership in different cultural and organizational contexts. **Paper Type.** Review Paper.

## Keywords:

leadership, project success, leadership styles, emotional intelligence, team cohesion, adaptability, organizational culture

---

## Contributor Details:

Daniil Abramov, Undergraduate Student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [abramov.d.yu@365.dnu.edu.ua](mailto:abramov.d.yu@365.dnu.edu.ua)

Yuliia Stasiuk, Sen. Lect., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [stasiuk\\_yu@365.dnu.edu.ua](mailto:stasiuk_yu@365.dnu.edu.ua)





У сучасних умовах швидкого розвитку технологій, глобалізації та постійних змін на ринку, успішне управління проектами стає дедалі важливішим для досягнення стратегічних цілей організацій. Одним із вирішальних факторів успіху будь-якого проекту є ефективне лідерство. Лідер проекту відіграє ключову роль у керуванні командою, забезпеченні ресурсів, ухваленні стратегічних рішень та подоланні перешкод, що виникають у процесі реалізації проекту (Гринько, 2023).

Проте, незважаючи на визнання важливості лідерства, існує недостатньо досліджень, що конкретно зосереджені на впливі різних лідерських стилів, навичок емоційного інтелекту та адаптивності на результативність проєктів (Eagly & Johannesen-Schmidt, 2001; Lyons & Schneider, 2009; Fischer & Sitkin, 2023; Piwowar-Sulej & Iqbal, 2023). Крім того, актуальними залишаються питання, як лідери можуть ефективно комунікувати з командами та адаптуватися до змін, особливо у кризових ситуаціях, що часто виникають у проєктній діяльності.

## Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є аналіз ролі лідера у забезпеченні успіху проєкту, а також дослідження впливу лідерських навичок на різних етапах управління проєктом. Дослідження спрямоване на вивчення стратегій, що дозволяють лідерам ефективно керувати командами та досягати поставлених цілей навіть за умов невизначеності.

Для досягнення мети дослідження було сформульовано такі завдання:

- Дослідити вплив різних стилів лідерства на успіх проєкту.
- Проаналізувати роль емоційного інтелекту у підтриманні мотивації та згуртованості команди.
- Вивчити, як адаптивність лідера впливає на здатність подолати непередбачені виклики.
- Розглянути стратегії лідерів для ефективного управління проєктом в умовах змін та криз.

## Методологія

Дослідження, присвячене аналізу ролі лідера у забезпеченні успіху проєкту, базується на якісних методах дослідження, що дозволяють отримати глибоке розуміння ключових аспектів лідерства та його впливу на різні етапи проєктного управління. У процесі роботи були використані такі методи:

1. Огляд наукової літератури з тематики лідерства, емоційного інтелекту, стилів керівництва та їх впливу на управління проєктами, що забезпечив наукову базу для подальшого аналізу,
2. У процесі дослідження проводився порівняльний аналіз різних стилів лідерства (трансформаційного, транзакційного та ситуативного) для виявлення їхнього впливу на успішність проєктів. Особлива увага приділялася

тому, як кожен стиль впливає на ефективність команди, мотивацію працівників та здатність досягати поставлених цілей в умовах обмежених ресурсів та змін,

3. Аналіз впливу емоційного інтелекту включав дослідження ролі емоційного інтелекту у підтриманні робочої атмосфери, злагодженості команди та управлінні стресовими ситуаціями,

4. На основі зібраної інформації було проведено систематизацію та узагальнення даних з метою формулювання висновків, що допомогло об'єднати теоретичні та практичні аспекти дослідження для створення єдиної концепції ефективного лідерства в управлінні проектами.

Використані методи дослідження забезпечили всебічний аналіз ролі лідера у проєктному менеджменті, а також надали можливість розробити практичні рекомендації для підвищення ефективності лідерства в сучасних умовах.

## **Роль лідера у забезпеченні ефективного управління проєктом**

Лідерство є одним із ключових аспектів управління проєктами, яке безпосередньо впливає на ефективність виконання проєктних завдань, згуртованість команди та досягнення визначених цілей (Ghorbani, 2023). Лідер проєкту виконує багатофункціональну роль, оскільки він не лише визначає стратегічні напрями розвитку, але й безпосередньо впливає на кожен етап життєвого циклу проєкту: від планування до виконання та контролю. У сучасному цифровому середовищі змінилися підходи до роботи, що підкреслює важливість командної співпраці (Hudoshnyk & Krupskiy, 2023). Проєктні команди тепер часто працюють у віддаленому або гібридному форматі, що вимагає від лідерів ефективної координації та забезпечення безперервної комунікації через цифрові інструменти (Krasnokutska & Podoprykhina, 2020).

Лідерство у контексті управління проєктами можна визначити як здатність мобілізувати ресурси і мотивувати команду до досягнення спільної мети, враховуючи складні обставини та постійні зміни. У сучасному цифровому середовищі лідерство набуває нових вимірів (Makedon et al., 2019), оскільки розвиток технологій вимагає від лідерів не тільки гнучкості та адаптивності, але й ефективного використання цифрових інструментів для управління проєктами. Лідери не просто керують командою, вони впливають на розвиток проєкту через свої рішення, навички комунікації, адаптивність та здатність мотивувати команду.

Існують різні стилі лідерства, які можуть по-різному впливати на успішність проєкту. Трансформаційне лідерство передбачає надихання та мотивацію команди через спільне бачення цілей проєкту (Islami & Mulolli, 2020; Mwita et al., 2023). Лідери цього стилю надають особливе значення індивідуальним потребам учасників команди, створюючи умови для їх особистісного та професійного зростання. Такий підхід дозволяє команді працювати з високою віддачею та творчістю.

Транзакційне лідерство базується на обміні «успіх за винагороду», де лідери зосереджуються на контролі та організації виконання завдань через чіткі інструкції та очікування (Mwita et al., 2023). Такий стиль управління дозволяє досягти високої ефективності в ситуаціях, де потрібне дотримання стандартів і процедур, однак може бути менш ефективним в умовах швидких змін та інновацій.

Ситуативне лідерство полягає у гнучкості лідера та його здатності змінювати стиль управління залежно від конкретних обставин (Podgórska & Detko, 2023). Цей підхід вимагає від лідера глибокого розуміння як індивідуальних характеристик членів команди, так і потреб проекту на різних етапах його реалізації. Наприклад, на етапі планування може бути потрібен більш директивний підхід, тоді як під час виконання проекту можуть бути ефективніші демократичні методи управління.

Вплив лідера проявляється на всіх ключових етапах проекту: планування, виконання та контроль. На етапі планування лідер відповідає за формулювання чітких цілей, координацію дій команди та розподіл ресурсів. Під час виконання лідер підтримує робочий темп, вирішує конфлікти та надає команді зворотний зв'язок, а на етапі контролю – забезпечує виконання проекту у визначені терміни та бюджет. Ефективне лідерство є критичним фактором, що безпосередньо впливає на успіх проекту. Лідер, який обирає правильний стиль управління, здатний мобілізувати команду для досягнення визначених результатів та адаптувати стратегію проекту під виклики сучасного середовища (Praise & Rapina, 2022).

## **Емоційний інтелект і його значення для лідера**

Емоційний інтелект (EI) відіграє важливу роль у лідерстві, особливо в умовах проектного управління, де взаємодія з командою є ключовим фактором успіху (Vivek & Krupskiy, 2024). Емоційний інтелект визначається як здатність людини розпізнавати, розуміти та контролювати як власні емоції, так і емоції інших людей. Для лідера, особливо у складних і стресових ситуаціях, ця навичка є життєво важливою, оскільки вона дозволяє ефективно керувати не тільки своїми реакціями, але й створювати позитивну робочу атмосферу в команді.

Одним із головних аспектів емоційного інтелекту є емоційна підтримка команди. Лідер, який володіє високим рівнем EI, здатен вчасно розпізнати ознаки стресу чи напруженості серед членів команди та надати необхідну підтримку (Шевяков, 2024). Це може бути допомога у вирішенні конфліктів, надання емоційної стабільності в кризових ситуаціях або ж мотивація команди у періоди спаду продуктивності. Емоційна підтримка лідера безпосередньо впливає на продуктивність команди, її моральний дух та здатність ефективно працювати у складних обставинах.

Крім того, емоційний інтелект дозволяє лідеру бути чуйним до потреб своїх співробітників, що підвищує рівень довіри та комунікації всередині колективу. Співчуття, розуміння і здатність поставити себе на місце інших допомагають лідерам знаходити підходи до кожного члена команди, що сприяє

кращій координації і злагодженості дій.

Лідери з високим ЕІ здатні мотивувати команди до досягнення високих результатів навіть за наявності викликів і перешкод. Наприклад, у технічно складних або інноваційних проєктах, де невизначеність і ризики є невід'ємною частиною процесу, лідери використовують емоційний інтелект для підтримки психологічної стійкості команди. У таких проєктах лідери здатні вчасно усунути тривогу команди, перенаправляючи фокус з проблем на пошук рішень, що сприяє підвищенню ефективності роботи.

Інший приклад застосування ЕІ полягає в тому, що лідери, здатні розпізнавати емоційні реакції членів команди, можуть своєчасно попереджати конфлікти або мінімізувати їхній вплив на проєкт. Це дозволяє уникати ескалації проблем та підтримувати стабільність у командній роботі, що, в свою чергу, сприяє досягненню цілей проєкту в строк і без додаткових витрат ресурсів.

Емоційний інтелект є незамінним інструментом лідера, який допомагає йому не лише керувати проєктом, а й зберігати здорову, позитивну атмосферу в команді. Лідери, які розвивають емоційний інтелект, мають значно вищі шанси досягти успіху, оскільки їх здатність керувати емоціями допомагає команді подолати виклики та забезпечити стійкий прогрес у реалізації проєктів.

## **Адаптивність лідера в умовах змін та криз**

Адаптивність є однією з ключових характеристик ефективного лідера в умовах невизначеності, постійних змін та кризових ситуацій, що часто виникають у процесі управління проєктами (Roth, 2022).

У сучасному середовищі, де зміни в економіці, технологіях або політичних умовах можуть мати суттєвий вплив на проєкти, здатність лідера швидко адаптуватися та приймати виважені рішення стає вирішальною для забезпечення успіху проєкту.

Значення адаптивності для управління проєктними ризиками полягає у тому, що лідер здатен оперативно реагувати на виникаючі загрози та непередбачені обставини, мінімізуючи їхній негативний вплив на проєкт. Адаптивний лідер швидко аналізує ситуацію, приймає рішення, що відповідають новим умовам, і коригує стратегію розвитку проєкту. Наприклад, під час значної зміни ринкових умов або появи нових технологій, лідер може переглянути початкові плани та забезпечити інтеграцію нових ресурсів чи змін у процес реалізації проєкту, щоб зберегти його актуальність і конкурентоспроможність.

Стратегії лідерів для подолання викликів та непередбачених обставин можуть включати кілька підходів, зокрема:

1. Гнучке планування – лідери розробляють кілька альтернативних сценаріїв розвитку подій, що дозволяє швидко перейти на інший шлях у разі зміни зовнішніх умов,

2. Проактивний підхід до ризиків - адаптивні лідери здійснюють постій-

ний моніторинг потенційних ризиків і загроз, передбачаючи можливі сценарії розвитку подій і готуючи відповідні заходи,

3. Делегування та розширення повноважень - адаптивні лідери надають своїм командам більше автономії та гнучкості у прийнятті рішень, що дозволяє швидше реагувати на зміни на місцях,

4. Відкрита комунікація – лідери забезпечують постійну комунікацію з командою, зацікавленими сторонами та клієнтами, що сприяє ефективному обміну інформацією та швидкому прийняттю рішень у кризових ситуаціях.

Таким чином, адаптивність є невід'ємною складовою успішного лідерства в управлінні проєктами. Лідери, які вміють швидко пристосовуватися до нових умов і криз, здатні не тільки зберегти контроль над проєктом, але й вивести його на новий рівень ефективності.

## **Комунікація як інструмент успішного лідерства**

Ефективна комунікація є одним із найважливіших інструментів успішного лідерства (Abbasi, 2011), особливо в управлінні проєктами, де координація дій команди та прозорість інформаційних потоків мають вирішальне значення. Відкрита та прозора комунікація дозволяє лідеру не лише доносити завдання та очікування, але й забезпечувати підтримку, мотивацію та довіру всередині команди. Запорукою ефективної комунікації є розвинута інформаційна компетентність фахівця (Krupskiy & Stasiuk, 2010).

Роль відкритої та прозорої комунікації у командній роботі полягає в тому, що вона створює атмосферу взаємної довіри та залученості, де кожен член команди відчуває себе важливою частиною процесу. Прозорість інформації дозволяє уникнути непорозумінь, а відкрите спілкування надає можливість обговорювати проблеми та знаходити рішення колективно. Лідери, які активно сприяють відкритій комунікації, створюють середовище, в якому кожен має можливість висловити свою думку та внести вклад у загальний успіх проєкту.

Одним із найважливіших аспектів лідерської комунікації є здатність лідера підтримувати довіру і мотивацію через комунікацію. Це досягається через послідовність дій та слів, відкрите обговорення проблем та надання конструктивного зворотного зв'язку. Лідери, які діють чесно та відкрито, надихають своїх співробітників працювати з більшою самовіддачею. Наприклад, у ситуаціях стресу або невизначеності, лідер, який визнає проблеми та відкрито обговорює можливі рішення, зміцнює довіру команди, підвищуючи її мотивацію до подолання труднощів.

Крім того, лідер повинен виявляти емпатію та емоційну підтримку через комунікацію, що сприяє створенню позитивної робочої атмосфери. Коли члени команди відчувають, що їхні емоції та переживання беруться до уваги, це підвищує їхню зацікавленість у спільному успіху проєкту. Відкрите, послідовне та прозоре спілкування допомагає лідерам не лише керувати процесом, але й створювати позитивний моральний клімат у команді, що сприяє досягненню високих результатів та забезпеченню успіху проєкту.

## Висновки

У результаті дослідження було встановлено, що лідерство є критично важливим чинником, який впливає на успіх проєкту на всіх його етапах. Ефективний лідер не лише спрямовує команду до досягнення цілей, але й відіграє ключову роль у формуванні робочої атмосфери, забезпеченні мотивації та подоланні викликів. Особлива увага приділяється тому, як лідерство впливає на процес планування, виконання та контролю проєктів, а також на управління непередбаченими ситуаціями.

Адаптивність і гнучкість лідера є необхідними для швидкої реакції на зміни та ризики, що виникають у процесі управління проєктом. Лідери, здатні адаптуватися до нових умов та інтегрувати інноваційні рішення, мають більше шансів забезпечити успіх проєкту навіть в умовах кризи чи невизначеності. Приклади успішного адаптивного лідерства підтверджують ефективність цього підходу.

Крім того, дослідження показало, що емоційний інтелект є важливою складовою лідерства, яка допомагає забезпечити підтримку команди, підвищити рівень довіри та злагодженості. Лідери, які здатні керувати емоціями як своїми, так і своєї команди, створюють сприятливі умови для досягнення високих результатів.

Не менш важливим аспектом є комунікація як інструмент лідера. Відкрите та прозоре спілкування сприяє налагодженню довіри в команді, підтриманню мотивації та зменшенню ймовірності виникнення конфліктів. Лідери, які ефективно використовують комунікаційні навички, мають можливість створювати позитивне середовище для роботи та підтримувати високий рівень продуктивності.

Таким чином, дослідження підтвердило, що лідер, який володіє адаптивністю, емоційним інтелектом та навичками ефективної комунікації, має всі необхідні інструменти для забезпечення успіху проєкту. Ці навички дозволяють не лише подолати виклики, що виникають у процесі реалізації проєкту, але й створити умови для сталого розвитку та досягнення стратегічних цілей.

## Посилання

- Гринько, Т. В. (Ред.) (2023). *Підприємництво: сучасні виклики, тренди та трансформації* (монографія). Видавець Біла К. О. <https://tinyurl.com/978-617-645-510-3>
- Шевяков, О. (2024). Моделювання лідерського потенціалу фахівця. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 349-352. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/112>
- Abbasi M.H., Siddiqi A., & Rahat ul Ain A. (2011). Role of effective communications for enhancing leadership and entrepreneurial skills in university students. *International Journal of Business and Social Science*, 2(10), 242–250. [https://ijbssnet.com/journals/Vol.%202\\_No.\\_10;\\_June\\_2011/25.pdf](https://ijbssnet.com/journals/Vol.%202_No._10;_June_2011/25.pdf)
- Eagly, A. H., & Johannesen-Schmidt, M. C. (2001). The leadership styles of women and men. *Journal of social issues*, 57(4), 781-797. <https://doi.org/10.1111/0022-4537.00241>
- Fischer, T., & Sitkin, S. B. (2023). Leadership styles: A comprehensive assessment and way forward. *Academy of Management Annals*, 17(1), 331-372.

- <https://doi.org/10.5465/annals.2020.0340>
- Ghorbani, A. (2023). A review of successful construction project managers' competencies and leadership profile. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 11(1), 76-95. <https://doi.org/10.22075/jrce.2022.24638.1560>
- Hudoshnyk, O. V., & Krupskiy, O. P. (2023). Media Possibilities of Comics: Modern Tools for the Formation and Presentation of Organizational Culture. *European Journal of Management Issues*, 31(1), 40-49. <https://doi.org/10.15421/192304>
- Islami, X., & Mulolli, E. (2020). A conceptual framework of transformational leadership as an influential tool in the team performance. *European Journal of Management Issues*, 28(1-2), 13-24. <https://doi.org/10.15421/192002>
- Krasnokutskaya, N., & Podoprykhina, T. (2020). Types and terminology of remote project teams. *European Journal of Management Issues*, 28(1-2), 34-40. <https://doi.org/10.15421/192004>
- Krupskiy, O.P., & Stasiuk, Y. (2010). Formation of information competence of the future manager/economist in the modern educational space. <https://philarchive.org/archive/KRU-20>
- Lyons, J. B., & Schneider, T. R. (2009). The effects of leadership style on stress outcomes. *The Leadership Quarterly*, 20(5), 737-748. <https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2009.06.010>
- Makedon, V., Krasnikova, N., Krupskiy, A., Stasiuk, Y. (2022). Arrangement of digital leadership strategy by corporate structures: a review. *Economic Studies*, 31(8), 19-40. <https://tinyurl.com/bdz3uw8w>
- Mwita, K. M., Ndikumana, E. D., & Ringo, C. J. (2023). The Role of Transformational and Transactional Leadership on Turnover Intentions in Tanzanian Commercial Banks: The Moderating Effect of Perceived Organizational Support. *European Journal of Management Issues*, 31(2), 102-112. <https://doi.org/10.15421/192309>
- Piowar-Sulej, K., & Iqbal, Q. (2023). Leadership styles and sustainable performance: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 382, 134600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134600>
- Podgórska, M., & Detko, Ł. (2023). Situational leadership in project management: empirical research of project managers. *Scientific Papers of Silesian University of Technology Organization and Management Series*, 2023(168), 375-392. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.168.26>
- Praise, I., & Rapina, R. (2022). The Role of Internal Audit, Leadership Effectiveness, and Organizational Culture in Risk Management Effectiveness. *European Journal of Management Issues*, 30(2), 83-91. <https://doi.org/10.15421/192208>
- Roth, O. D. (2022). *Adaptive crisis management skills for effective leadership during times of uncertainty and chaos (Doctoral dissertation)*. Alliant International University. <https://tinyurl.com/58atbj2>
- Vivek, R., & Krupskiy, O. P. (2024). EI & AI In Leadership and How It Can Affect Future Leaders. *European Journal of Management Issues*, 32(3), 174-182. <https://mi-dnu.dp.ua/index.php/MI/article/view/512>

# Емоційний інтелект як фактор успішного управління командами

Інна Волошина , Олександр Крупський 

**Purpose.** The purpose of this study is to explore the role of emotional intelligence (EI) in enhancing team management effectiveness. Specifically, how EI contributes to team dynamics, communication, conflict resolution, and overall team performance. **Design / Method / Approach.** While writing the work, the materials of the work of leading scientists were studied. The research employed a mixed-methods approach, combining qualitative and quantitative data collection methods. **Findings.** The findings indicate a strong positive correlation between high levels of emotional intelligence in team leaders and improved team performance metrics, including productivity, collaboration, and job satisfaction. Qualitative data revealed that leaders with high EI were more adept at recognizing team members' emotions, fostering open communication, and motivating their teams. **Theoretical Implications.** This research contributes to the existing body of literature on emotional intelligence. It supports the theoretical framework that suggests EI is a critical competency for effective leadership and team dynamics, extending the understanding of how emotional intelligence impacts organizational behavior. **Practical Implications.** The findings highlight the importance of incorporating emotional intelligence training into leadership development programs. Organizations should prioritize EI in their hiring processes for team leaders and provide training to enhance emotional competencies. Fostering a culture that values emotional awareness can lead to more cohesive and high-performing teams. **Originality / Value.** This study adds value by bridging the gap between emotional intelligence theory and practical team management applications. It emphasizes the necessity of EI in leadership roles and provides actionable insights for organizations seeking to improve team dynamics and performance. **Research Limitations / Future Research.** Future research could explore longitudinal studies to assess the long-term effects of emotional intelligence on team management and investigate the role of EI in diverse cultural contexts. **Paper Type.** Practitioner Paper

## Keywords:

emotional intelligence, team management, development, leader, team members, management decisions

## Contributor Details:

Inna Voloshyna, Undergraduate Student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [voloshyna\\_i@365.dnu.edu.ua](mailto:voloshyna_i@365.dnu.edu.ua)

Oleksandr P. Krupskyyi, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [krupskyy71@gmail.com](mailto:krupskyy71@gmail.com)



Емоційний інтелект (ЕІ) стає все більш важливим аспектом сучасного управління командами. У світі, де технології та автоматизація займають провідні позиції, людський фактор залишається ключовим для успіху організацій. Емоційний інтелект, який включає в себе здатність розуміти, усвідомлювати та управляти власними емоціями, а також емоціями інших, має значний вплив на ефективність управлінських процесів.

По-перше, емоційний інтелект сприяє створенню позитивної командної культури. Лідери з високим рівнем ЕІ здатні формувати атмосферу довіри та підтримки, що в свою чергу стимулює співпрацю та відкритість серед членів команди. Коли працівники відчувають, що їхні емоції та думки важливі, вони більш схильні ділитися ідеями, брати на себе відповідальність та активно залучатися до процесів прийняття рішень (Голобородько та Буркова, 2023). По-друге, емоційний інтелект допомагає у вирішенні конфліктів. У будь-якій команді можуть виникати непорозуміння та суперечки, але лідери з високим ЕІ можуть ефективно управляти такими ситуаціями. Вони здатні розпізнавати емоції, які стоять за конфліктами, і знаходити способи для їх конструктивного вирішення, що знижує рівень стресу та покращує взаєморозуміння. По-третє, ЕІ є невід'ємною складовою емоційної праці (Mindeguiá et al., 2021; Krupskiy et al., 2022), та комунікативної компетентності (Крупський та Стасюк, 2024).

Крім того, емоційний інтелект впливає на мотивацію та продуктивність команди (Grynko et al., 2018; Олійник, 2023). Лідери, які вміють розпізнавати та підтримувати емоційний стан своїх підлеглих, можуть надати їм необхідну підтримку та натхнення. Це, в свою чергу, призводить до підвищення задоволеності працівників своєю роботою, що позитивно позначається на загальних результатах команди. Не менш важливим є те, що емоційний інтелект сприяє розвитку лідерських якостей (Заграй, 2021). Лідери з високим ЕІ здатні адаптувати свій стиль управління до потреб команди, враховуючи емоційний контекст ситуації. Це дозволяє їм бути більш гнучкими та ефективними у своїх діях, що є критично важливим у швидко змінюваному бізнес-середовищі.

## Методи

У дослідженні було застосовано комплексний підхід, що поєднує кількісні та якісні методи для отримання всебічного розуміння цього феномену. Першочергово було проведено огляд літератури, що дозволило сформулювати теоретичну основу та виявити основні тенденції в існуючих дослідженнях. Аналіз наукових статей, монографій і дисертацій дав змогу окреслити ключові аспекти емоційного інтелекту та його вплив на управлінські практики.

Спостереження за роботою команд у реальних умовах дало змогу зафіксувати прояви емоційного інтелекту під час міжособистісних взаємодій та управлінських рішень. Це надає додаткову глибину дослідженню, оскільки дозволяє оцінити, як емоційний інтелект впливає на ефективність роботи команди в динамічному середовищі.

Було проведено аналіз конкретних кейсів успішних команд, де емоційний інтелект відігравав вирішальну роль у досягненні цілей. Це дозволило виявити практичні аспекти впровадження емоційного інтелекту в управлінські стратегії.

## Результати та обговорення

У ході дослідження були отримані результати, які підтверджують важливість емоційного інтелекту для ефективності управлінських процесів. Аналіз даних, зібраних за допомогою анкетування, показав, що керівники з високим рівнем емоційного інтелекту демонструють кращі результати у формуванні позитивного клімату в команді. Вони здатні ефективніше розпізнавати та управляти емоціями своїх підлеглих, що, в свою чергу, сприяє підвищенню мотивації та залученості членів команди.

Дослідження показують, що ЕІ менеджерів позитивно впливає на ефективність команди, згуртованість та досягнення цілей (Barinua et al., 2022). ЕІ вважається критично важливим аспектом лідерства (Vivek and Krupskyi, 2024), що впливає на управління конфліктами та подолання стресу (Aseery et al., 2023). У будівельних проєктах ЕІ менеджерів позитивно впливає на ефективність команди за допомогою згуртованості команди, при цьому тривалість проєкту пом'якшує цей зв'язок (Zhang and Hao, 2022). Помірні рівні ЕІ посилюють вплив досвіду на задоволеність клієнтів, тоді як вищі рівні необхідні для позитивного впливу на команду. Помірний ЕІ також покращує вплив експертизи на ефективність команди та взаємодію із зацікавленими сторонами (Sposito et al., 2023). Ці результати наголошують на важливості розгляду ЕІ поряд з технічними навичками при виборі та навчанні менеджерів проєктів для покращення загальних результатів проєкту.

Взаємозв'язок між емоційним інтелектом (ЕІ) і командною продуктивністю є важливою темою в сучасному управлінні та організаційній психології. Емоційний інтелект визначається як здатність розпізнавати, розуміти та управляти власними емоціями, а також емоціями інших людей (Заграй, 2021). Ця здатність має безпосередній вплив на продуктивність команди, оскільки емоції грають ключову роль у взаємодії між членами команди, їхньому спілкуванні та спільному виконанні завдань.

Основними компонентами емоційного інтелекту є самосвідомість, саморегуляція та соціальні навички. Між цими елементами існує тісний взаємозв'язок: регулювання емоцій неможливе без усвідомлення власних почуттів, а соціальні навички формуються на основі особистісних якостей (Крупський & Кіба, 2012).

Перш за все, команди з високим рівнем емоційного інтелекту здатні краще справлятися зі стресом і конфліктами. Коли члени команди вміють розпізнавати та регулювати свої емоції, вони менш схильні до емоційних спалахів і можуть конструктивно вирішувати суперечки. Це створює позитивну атмосферу, що сприяє більшій зосередженості на спільних цілях і за-

вданнях, що, в свою чергу, підвищує продуктивність це потрібно враховувати під час формування та змін організаційної культури підприємств (Крупський, 2014).

Емоційний інтелект сприяє розвитку ефективної комунікації в команді (Гайдукевич & Полішук, 2023). Члени команди, які мають високий рівень ЕІ, можуть відкрито виражати свої думки та почуття, що веде до більш глибокого розуміння між ними. Це дозволяє уникати непорозумінь і покращує співпрацю, оскільки всі учасники команди відчувають себе почутими і цінними (Neves, 2024). Залучення всіх членів команди у процес обговорення і прийняття рішень також сприяє підвищенню їхньої мотивації та відповідальності за результати спільної роботи.

Важливим аспектом є також те, що емоційний інтелект сприяє розвитку емпатії, що є критично важливим для командної роботи. Коли члени команди здатні розуміти і відчувати емоції один одного, це створює атмосферу довіри і підтримки. Взаємна підтримка підвищує моральний дух команди і заохочує її членів до досягнення високих результатів.

Крім того, лідери з високим рівнем емоційного інтелекту можуть ефективно мотивувати свої команди, встановлюючи чіткі цілі та надаючи зворотний зв'язок, що допомагає підвищити загальну продуктивність (Дуляба, 2020). Вони можуть адаптувати свій стиль управління відповідно до емоційного стану команди, що дозволяє створити середовище, в якому кожен може розвиватися і досягати своїх цілей.

Взаємозв'язок між емоційним інтелектом і командною продуктивністю є складним і багатограним. Високий рівень емоційного інтелекту у членів команди та її лідерів сприяє покращенню комунікації, зниженню конфліктності, розвитку емпатії та підтримки, що в результаті веде до підвищення продуктивності та ефективності роботи команди (Zos-Kior et al., 2020). У сучасних умовах, коли співпраця та командна робота стають дедалі важливішими, розвиток емоційного інтелекту стає необхідністю для досягнення успіху в будь-якій організації.

Розвиток ЕІ є важливим процесом, що сприяє покращенню міжособистісних відносин, комунікації та загальної ефективності в роботі (Kharchenko & Semenikhina, 2024). Існує кілька методів, які допомагають у цьому процесі, серед яких тренінги, коучинг та самоосвіта.

Тренінги з розвитку емоційного інтелекту зазвичай проводяться у групах і включають різноманітні вправи, рольові ігри та дискусії, що дозволяють учасникам практикувати навички розпізнавання та управління емоціями. Такі тренінги часто фокусуються на розвитку навичок активного слухання, емпатії, комунікації та конструктивного вирішення конфліктів. Учасники мають можливість отримати зворотний зв'язок від тренера та інших учасників, що сприяє глибшому усвідомленню своїх сильних і слабких сторін у контексті емоційного інтелекту.

Коучинг є ще одним ефективним методом розвитку ЕІ, який передбачає індивідуальну роботу з коучем. Коучинг допомагає особі зосередитися на своїх цілях, виявити емоційні блоки та розробити стратегії для їх подолання.

Коуч може використовувати різноманітні техніки, такі як запитання, рефлексія та підтримка, щоб допомогти клієнту краще зрозуміти свої емоції та навчитися їх ефективно управляти (Afshari, Nasab & Dickson, 2020). Цей підхід дозволяє досягти глибшого рівня самосвідомості та розвитку особистісних якостей, що сприяє підвищенню емоційного інтелекту.

Самоосвіта також відіграє важливу роль у розвитку емоційного інтелекту. Це може включати читання книг, статей, перегляд відео та участь у вебінарах, присвячених темі емоційного інтелекту. Самоосвіта дозволяє індивідууму вивчати теорію ЕІ, розуміти його складові та застосовувати знання на практиці. Крім того, ведення щоденника емоцій може стати корисним інструментом для самоаналізу, оскільки це дозволяє відстежувати власні емоційні реакції, виявляти тригери та розробляти стратегії для їх управління.

Усі ці методи – тренінги, коучинг і самоосвіта – можуть бути використані окремо або в комбінації, що дозволяє створити індивідуальний підхід до розвитку емоційного інтелекту. Важливо пам'ятати, що розвиток ЕІ є безперервним процесом, який потребує часу, зусиль та практики. Чим більше індивідуум інвестує в своє навчання та саморозвиток, тим більших успіхів він може досягти в управлінні своїми емоціями та взаємодії з іншими.

Одним із прикладів успішної практики є компанія Google, яка активно впроваджує принципи емоційного інтелекту в свою корпоративну культуру. У рамках програми «Project Aristotle» компанія досліджувала фактори, що впливають на ефективність команд, і виявила, що емоційний інтелект, зокрема, здатність до емпатії та відкритої комунікації, є критично важливими для успішної роботи команд. Google заохочує своїх менеджерів розвивати ці навички через тренінги та навчальні програми, що дозволяє створити середовище, в якому співробітники відчують підтримку та можуть вільно висловлювати свої думки.

Компанія Johnson & Johnson впровадила програму «Leadership Imperatives», що акцентує увагу на розвитку ЕІ серед керівників. У рамках цієї програми менеджери навчаються розпізнавати та управляти своїми емоціями, а також розвивати навички активного слухання та конструктивного зворотного зв'язку. Це сприяє зміцненню довіри в командах і покращенню міжособистісних відносин та підвищує загальну ефективність роботи.

Ще одним прикладом є компанія Zappos, яка відома своєю унікальною корпоративною культурою, що базується на принципах емоційного інтелекту. У Zappos акцентують увагу на важливості емоційного зв'язку між співробітниками та клієнтами. Менеджери проходять тренінги з розвитку емоційного інтелекту, щоб краще розуміти потреби своїх команд і забезпечувати підтримку в складних ситуаціях. Це дозволяє компанії створити атмосферу, де співробітники відчують себе цінними і мотивованими до високих досягнень.

Приклад компанії Microsoft демонструє, як емоційний інтелект може бути інтегрований у стратегію управління. Під керівництвом Сатіа Наделли компанія переосмислила свої принципи управління, акцентуючи увагу на «культурі зростання», що включає розвиток емоційного інтелекту серед співробітників. Це зумовило покращення командної роботи, підвищення

інноваційності та загального задоволення працівників. Усі ці приклади свідчать про те, що впровадження емоційного інтелекту в управлінні командами не лише покращує робочі процеси, але й сприяє створенню здорового й продуктивного робочого середовища, де кожен співробітник може реалізувати свій потенціал.

Оцінка ефективності розвитку емоційного інтелекту у менеджерів є важливим аспектом сучасного управлінського процесу, оскільки емоційний інтелект (EI) суттєво впливає на якість управлінських рішень, рівень мотивації команди та загальну продуктивність організації (Жук & Дроздовська, 2022). Для початку необхідно визначити ключові компоненти емоційного інтелекту, які включають самосвідомість, саморегуляцію, соціальну свідомість і управління відносинами. Оцінка ефективності розвитку EI у менеджерів може здійснюватися через кілька методів.

Першим є використання спеціалізованих опитувальників та тестів, таких як EQ-і або MSCEIT, які дозволяють виміряти рівень емоційного інтелекту до і після проходження навчальних програм, допомагають виявити сильні та слабкі сторони менеджерів у сфері емоційного інтелекту.

Другим методом є проведення 360-градусних оцінок, де колеги, підлеглі та керівники надають зворотний зв'язок щодо поведінки менеджерів у різних ситуаціях. Це дозволяє отримати об'єктивну картину змін у стилі управління та взаємодії з командою.

Третім важливим аспектом є моніторинг показників продуктивності команди та загальної атмосфери в колективі. Зміни в рівні задоволеності співробітників, зниження плинності кадрів та покращення командної роботи можуть свідчити про ефективність розвитку EI у менеджерів.

Крім того, слід враховувати якісні показники, такі як зміни в комунікаційних навичках, здатність до конструктивного зворотного зв'язку та управління конфліктами. Після реалізації програм розвитку емоційного інтелекту, компанії можуть проводити регулярні оцінювання, щоб відстежувати прогрес і вносити корективи в навчальні програми (Костюк, 2014). Важливо також забезпечити підтримку менеджерів у процесі застосування нових навичок на практиці, оскільки без належної практики знання можуть залишитися теоретичними. Успішна реалізація програм розвитку емоційного інтелекту вимагає зобов'язань з боку керівництва та створення сприятливого середовища для навчання та розвитку (Klochko, 2021).

Таким чином, оцінка ефективності розвитку емоційного інтелекту у менеджерів є комплексним процесом, що включає як кількісні, так і якісні методи, які дозволяють зрозуміти, як зміни в емоційному інтелекті впливають на управлінські практики та загальну продуктивність організації.

## **Висновки**

У роботі акцентовано увагу на важливості емоційного інтелекту як критично значущого компонента успішного управління, оскільки він суттєво впливає на здатність менеджерів приймати обґрунтовані рішення, ефективно комунікувати та підтримувати позитивну атмосферу в команді. Розглянуто

методи оцінки ефективності розвитку емоційного інтелекту, серед яких виділено стандартизовані тести, 360-градусні оцінки та моніторинг показників продуктивності. Зворотний зв'язок від колег і підлеглих визнано важливим елементом оцінки, оскільки він дає можливість виявити реальні зміни у поведінці менеджерів та їхній здатності до управління емоціями. Наголошено на необхідності практичної реалізації знань, оскільки розвиток емоційного інтелекту вимагає не лише теоретичних знань, але й практичних навичок. Визначено, що інвестиції в розвиток емоційного інтелекту можуть призвести до зниження плинності кадрів, підвищення задоволеності співробітників та покращення загальної продуктивності організації. Регулярний моніторинг ефективності розвитку емоційного інтелекту є необхідним для виявлення проблем та коригування навчальних програм відповідно до потреб організації. Успіх програм розвитку емоційного інтелекту залежить також від підтримки з боку вищого керівництва, яке повинно демонструвати власний приклад та активно залучати співробітників до навчання. Таким чином, розвиток емоційного інтелекту у менеджерів є стратегічно важливим процесом, що потребує системного підходу, регулярного оцінювання та підтримки з боку всієї організації для досягнення максимальних результатів.

## References

- Гайдукевич, К., & Поліщук, Л. (2023). Емоційний інтелект як важлива складова успіху в професійній діяльності івент-менеджера. *Питання культурології*, (41), 78-88. <https://doi.org/10.31866/2410-1311.41.2023.276695>
- Голобородько, Т. В., & Буркова, Л. А. (2023). Етичні аспекти лідерства в управлінській практиці: роль інформаційного забезпечення та менеджменту персоналу в умовах розвитку цифрового суспільства. *Інвестиції: практика та досвід*, (14), 47–54. <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2023.14.47>
- Дуляба, Н. І., & Озарчук, К. С. (2020). Особливості формування системи управління персоналом підприємств у сучасних умовах. *Інфраструктура ринку*, (39), 165-170. <https://doi.org/10.32843/infrastruct39-27>
- Жук, О. П., & Дроздовська, Л. О. (2022). Формування управлінських компетентностей менеджерів і молодих фахівців в умовах освітніх викликів та розвитку бізнесу. *Ефективна Економіка*, 11. <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2022.11.34>
- Заграй, Л. Д. (2021). Емоційний інтелект як складник професійної компетентності менеджера. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Психологія. Практична психологія. Професійна й організаційна психологія*, 32(6), 47-54. <https://doi.org/10.32838/2709-3093/2021.6/08>
- Костюк, А. В. (2014). Емоційний інтелект та шляхи його розвитку. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Психологічні науки*, (2 (1)), 85-89. <http://surl.li/kvhwcf>
- Крупський, О. П., & Кіба, К. С. (2012). Взаємозв'язок між емоційною компетентністю та лідерством як складниками педагогічної діяльності. *Педагогіка вищої та середньої школи*, 36, 222-229. <https://journal.kdpu.edu.ua/ped/article/download/3416/3127>
- Крупський, О. П., & Стасюк, Ю. М. (2024). Ефективна комунікація в галузі туризму. Маркетингові та організаційні механізми повоєнного розвитку галузі, 136-138. [https://www.researchgate.net/publication/375834752\\_Efektivna\\_komunikacia\\_v\\_galuzi\\_turizmu](https://www.researchgate.net/publication/375834752_Efektivna_komunikacia_v_galuzi_turizmu)
- Крупський, О. П. (2014). Процес формування і розвитку організаційної культури

- туристичних підприємств. Управління розвитком підприємства в інтеграційних умовах: колект. монографія/за заг. ред. ТВ Гринько, 162-177. <http://surl.li/fjjjmi>
- Олійник, І. В. (2023). Роль емоційного інтелекту в ефективному лідерстві. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка*, (16), 222-228. <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2023.16.29>
- Afshari, L., Nasab, A. H., & Dickson, G. (2020). Organizational Culture, Social Capital, and Knowledge Management. *International Journal of Knowledge Management*, 16(2), 52–66. <https://doi.org/10.4018/ijkm.2020040104>
- Aseery, M., Mahran, S., & Felemban, O. (2023). The relationship between emotional intelligence and conflict management strategies from the nurse managers' perspective. *Cureus*, 15(3). <https://doi.org/10.7759/cureus.35669>
- Barinua, V., Nwoji, C. C. C.-, & Ford, H. O. (2022). Manager's Emotional Intelligence and Team Effectiveness: A Theoretical Review. *Saudi Journal of Business and Management Studies*, 7(5), 120–124. <https://doi.org/10.36348/sjbms.2022.v07i05.001>
- Grynko, T., Krupskiy, O. P., Koshevyi, M., & Maximchuk, O. (2018). Tangible and intangible rewards in service industries: *Problems and prospects*. *Journal of Applied Economic Sciences*, 12(8), 2481–2491. [https://www.researchgate.net/publication/323540055\\_Tangible\\_and\\_intangible\\_reward\\_s\\_in\\_service\\_industries\\_Problems\\_and\\_prospects](https://www.researchgate.net/publication/323540055_Tangible_and_intangible_reward_s_in_service_industries_Problems_and_prospects)
- Klochko, A. O. (2021). Features of the development of innovative management styles by team roles managers of educational organizations. *Dnipro Scientific Journal of Public Administration, Psychology, Law*, 1, 83–88. <https://doi.org/10.51547/ppp.dp.ua/2021.1.13>
- Kharchenko, I. I., & Semenikhina, O. V. (2024). Section 27. Culture of professional communication and emotional intelligence: identifying connections. *“Modern educational strategies under the influence of the development of the information society and European integration,”* 541–591. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-405-4-27>
- Krupskiy, O. P., Stasiuk, Y. M., Hromtseva, O. V., & Lubenets, N. V. (2022). The Influence of Emotional Labor of Family Doctors on their Well-Being and Job Satisfaction. *European Journal of Management Issues*, 30(4), 215-223. <https://doi.org/10.15421/192218>
- Mindeguia, R., Aritzeta, A., Garmendia, A., Martinez-Moreno, E., Elorza, U., & Soroa, G. (2021). Team Emotional Intelligence: Emotional Processes as a Link Between Managers and Workers. *Frontiers in Psychology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.619999>
- Neves, R. (2024). *Collaboration and Team Dynamics*. In *The Engineering Leadership Playbook: Strategies for Team Success and Business Growth* (pp. 113-179). Berkeley, CA: Apress. [https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0140-2\\_3](https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0140-2_3)
- Sposito, L., Scafuto, I. C., Serra, F. R., & Ferreira, M. P. (2023). Influence of the project managers' expertise and experience in the success of projects: the moderating effect of emotional intelligence. *International Journal of Managing Projects in Business*, 17(1), 1–26. <https://doi.org/10.1108/ijmpb-06-2023-0129>
- Vivek, R., & Krupskiy, O. P. (2024). EI & AI in leadership and how it can affect future leaders. *European Journal of Management Issues*, 32(3), 174-182. <https://mi-dnu.dp.ua/index.php/MI/article/view/512>
- Zhang, Q., & Hao, S. (2022). Construction Project Manager's Emotional Intelligence and Team Effectiveness: The Mediating Role of Team Cohesion and the Moderating Effect of Time. *Frontiers in Psychology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.845791>
- Zos-Kior, M., Hnatenko, I., Isai, O., Shtuler, I., Samborskiy, O., & Rubezhanska, V. (2021). Management of efficiency of the energy and resource saving innovative projects at the processing enterprises. *Management Theory and Studies for Rural Business and Infrastructure Development*, 42(4), 504–515. <https://doi.org/10.15544/mts.2020.52>



# Digital twin as a tool of the real-time enterprise management mechanism

Oleksandr Bazyk , Tetiana Grynko 

**Purpose.** This study is devoted to the actual problem of using digital doubles as a tool for an effective mechanism of real-time enterprise management in the context of modern global challenges. The paper considers the concept of a digital double of an enterprise (EDT) as a means of increasing adaptability of organizations in the context of the digital economy. **Design / Method / Approach.** The study analyzes the key factors determining the topicality of the topic, including the unprecedented level of instability of the business environment, the limitations of traditional management methods, and the potential of digital technologies to transform business processes. Special attention is paid to the ability of EDT to integrate strategic planning with operational activities. **Findings.** The paper examines the theoretical and practical aspects of the implementation of digital doubles, including their role in increasing the efficiency of resource use, risk management, and the development of new business models. **Theoretical Implications.** The value of the research lies in the development of a new concept of creating digital duplicates of enterprises based on a holistic approach based on the unification of the accounting of all enterprise assets and their presentation in the form of a multi-layered multi-graph. **Practical Implications.** The practical value is expressed in the possibility of increasing the efficiency of enterprise management through the creation of digital doubles capable of autonomously performing certain tasks and interacting with each other, which optimizes the use of resources, improves decision-making processes and opens new opportunities for inter-corporate interaction. **Originality / Value.** The results of the study have both theoretical and practical significance, opening new perspectives for scientific innovation, technological progress and economic growth in the context of digital business transformation. **Research Limitations / Future Research.** An important aspect of future research is also the solution of organizational challenges associated with the implementation of such a system at enterprises. **Article type.** Case Study, Practitioner Paper.

## Keywords:

digital twin, enterprise, resource management, adaptability, real time, digital transformation

## Contributor Details:

Oleksandr Bazyk, PhD candidate, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [bazyk\\_o@365.dnu.edu.ua](mailto:bazyk_o@365.dnu.edu.ua)

Tetiana Grynko, Prof., Dr.Sc., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [greisy25@gmail.com](mailto:greisy25@gmail.com);





In today's world, business structures face an unprecedented level of dynamism and uncertainty. Globalization, technological breakthroughs, and changing consumer preferences create an environment where the ability to adapt quickly becomes a key factor for the survival and success of enterprises. This situation demands new, more flexible management approaches that allow business structures to respond promptly to changes and remain competitive. The globalization of the economy, rapid technological progress, changes in consumer preferences, and geopolitical factors create an environment where changes occur at an incredible pace. The COVID-19 pandemic has demonstrated how quickly business conditions can change and how important it is to have flexible management systems capable of adapting to new realities.

The rapid development and convergence of telecommunications, information, and computer technologies have led to the formation of a new economic landscape known as the "digital economy." This concept, introduced by Don Tapscott (1995), reflects fundamental changes in the ways value is created, exchanged, and consumed in the modern world.

## **Objective and tasks**

The digital economy is characterized by the pervasive implementation of digital technologies in all areas of human activity, including production, trade, finance, education, public administration, and social life as a whole. A key feature of this new economic paradigm is the use of digital data as a primary resource, transforming traditional business models and creating new opportunities for innovation and growth.

Traditional enterprise management methods, which were considered effective until recently, increasingly show their inability to cope with modern challenges. Hierarchical management structures, rigid budgets, and long-term plans often become obstacles to quick adaptation to changes. Business structures that cannot respond promptly to market changes risk losing their competitive positions or even disappearing from the market.

In this context, the concept of the enterprise digital twin (EDT) offers an innovative approach to enhancing the flexibility and adaptability of enterprises. An EDT is a digital replica of an enterprise that integrates detailed models of all business processes, organizational structures, and information systems. The key feature of an enterprise digital twin is its ability to operate in real time, constantly updating according to changes in the internal environment of the enterprise and external challenges.

Using a graphical, machine-readable knowledge representation in the digital twin allows for the creation of a dynamic, easily adaptable model of the enterprise. This makes it possible to quickly analyze various development scenarios, assess the potential outcomes of management decisions, and optimize enterprise activities in real time.

A significant innovation of the enterprise digital twin is the use of contextual spaces that provide semantically structured information. This significantly increases the clarity and applicability of models, making them more accessible to a

wide range of users—from top management to line managers.

The concept of the enterprise digital twin offers a fundamentally new approach to management, creating a virtual copy of the enterprise that reflects all its processes and interconnections in real time. This allows for not only monitoring the current state of the enterprise but also modeling different development scenarios, predicting the consequences of decisions made, and optimizing enterprise activities in real time.

## Materials and methods

It is important to note that the concept of the digital twin goes beyond a simple technological solution. It is a fundamentally new approach to enterprise management, based on the synthesis of the most advanced achievements in various fields of science and technology. It integrates into a single system:

1. Information technologies: the use of cloud computing, big data, and the Internet of Things (IoT) to create a comprehensive digital model of the enterprise.

2. Artificial intelligence: applying machine learning and neural networks to analyze complex interconnections, predict trends, and automate decision-making processes.

3. Data analysis: using advanced data processing and visualization methods to gain deep insights into enterprise operations.

4. Management theory: implementing modern concepts of strategic and operational management to optimize business processes.

This integration allows for the implementation of the continuous improvement principle, known as the Deming cycle (Plan-Do-Check-Act), at a qualitatively new level (Tague, 2005). Instead of periodic iterations, the digital twin ensures a continuous, ongoing optimization process:

- Planning (Plan): continuous modeling and forecasting of various development scenarios.

- Execution (Do): automated implementation of optimal solutions in real time.

- Checking (Check): continuous monitoring and analysis of results.

- Action (Act): instant strategy and tactics adjustments based on obtained data.

The digital twin allows an organization not just to react to changes but to predict them and proactively adapt, which is critically important in the highly volatile modern markets.

Moreover, the digital twin transforms the very nature of managerial activity. It shifts the decision-making process from intuitive and periodic to scientifically grounded and continuous. This allows managers to focus on strategic issues while routine operational decisions are automated.

Thus, the digital twin becomes not just a tool but a new management philosophy, enabling enterprises to achieve unprecedented levels of efficiency, flexibility, and innovation in the digital economy environment.

Additionally, the implementation of digital twins opens up new opportunities

for optimizing enterprise resource use. In the face of growing competition and resource scarcity, the ability to manage existing assets efficiently becomes a critical success factor. The digital twin allows for the identification of inefficiencies in resource use, optimization of production processes, and reduction of operational costs.

It is also worth noting the potential of digital twins in the context of developing new business models. The ability to analyze large volumes of data about enterprise operations in real time opens up new horizons for creating innovative products and services, personalizing offers for customers, and entering new markets.

In an environment where the digital economy is becoming the dominant paradigm, the ability of enterprises to effectively utilize digital technologies becomes a key factor in competitiveness. In this context, the digital twin is not just a technological solution but a strategic tool that enables enterprises to fully realize the potential of digital transformation.

Furthermore, the concept of the digital twin goes beyond the traditional understanding of the digital economy as merely transferring business processes online. It offers an innovative approach to enterprise management that combines elements of virtual reality, predictive analytics, and adaptive management.

However, the implementation of digital twins is associated with several challenges, including data security issues, the need for significant investment in technology and personnel retraining, and integration problems with existing management systems. Addressing these challenges requires deep scientific understanding and the development of new approaches to enterprise management in the digital era.

Therefore, the topic "digital twin as a tool for building an effective enterprise management mechanism in real time in the face of ongoing global challenges" demonstrates exceptional relevance and significance in the context of modern economic, technological, and management paradigms.

From a theoretical perspective, research on digital twins opens up new horizons in understanding the nature of the enterprise as a complex adaptive system operating under constant uncertainty. It promotes the development of interdisciplinary approaches, combining achievements in information technology, systems theory, cybernetics, artificial intelligence, and organizational management. This creates a foundation for forming a new management paradigm that meets the challenges of the digital era.

From a practical perspective, the concept of the digital twin offers specific tools and methods for increasing the efficiency and competitiveness of enterprises. It allows for solving such critical tasks as business process optimization, market trend forecasting, risk and resource management in real time.

In the context of digital economy development, research on digital twins opens up new opportunities for business model transformation, creation of innovative products and services, as well as for developing new forms of interaction between enterprises, consumers, and the state.

This topic also has significant potential for international cooperation and experience exchange, as the challenges of digital transformation are global and

require joint efforts from the scientific community, businesses, and state structures from different countries.

Thus, the study of digital twins as a tool for building an effective enterprise management mechanism in real time not only addresses the urgent needs of modern business but also forms the basis for developing a new management paradigm in the digital economy. It opens up broad perspectives for scientific innovation, technological progress, and economic growth, making this topic one of the most relevant and promising in modern economic science and management practice.

## Results

An analysis of existing scientific contributions in this field demonstrates a wide range of approaches and applications, indicating the high potential and relevance of this technology.

Historically, the concept of the digital twin originates from Grieves' work in 2002, who proposed a three-component model that included a physical object, its virtual copy, and the connection between them for data exchange. This fundamental idea became a catalyst for further research and innovation in the field (Barricelli et al., 2019). Over time, the understanding of digital twins has significantly evolved, transforming into the concept of complex virtual constructs that not only reflect physical objects but also actively interact with the real world, processing data and influencing physical processes.

A significant contribution to the development of digital twin theory has been made by research aimed at their classification and taxonomy. A detailed taxonomy with 11 dimensions was developed, which systematized various aspects of digital twins—from data collection methods to the conceptual scope of their functionality. Based on this taxonomy, five archetypes of digital twins were identified, ranging from the simplest to the most complex implementations (Van der Valk et al., 2021). This classification not only helps to better understand the diversity of possible implementations but also lays the foundation for standardization and comparison of different approaches to creating digital twins.

A critical aspect of the research has been the clear distinction between the concept of digital twins and related concepts such as digital models or digital streams. This distinction is crucial to avoid terminological confusion and ensure accuracy in scientific discussions and practical applications (Van der Valk et al., 2021).

The practical application of digital twins covers a wide range of industries, including manufacturing, aviation, healthcare, and other sectors. Each industry has its specific requirements and implementation features, leading to the development of specialized approaches and methodologies. For example, in manufacturing, digital twins are used for optimizing production processes and predictive maintenance of equipment, in aviation—for modeling aircraft behavior and enhancing flight safety, and in healthcare—for personalized treatment and modeling physiological processes (Qi & Tao, 2018)

The technological aspects of creating digital twins are also the subject of active research. Particular attention is paid to integrating such technologies as the

Internet of Things (IoT), cloud computing, big data, and artificial intelligence. IoT provides real-time data collection from physical objects, cloud computing offers the necessary computational power for processing this data, while big data technologies and artificial intelligence enable the analysis of vast amounts of information and the identification of hidden patterns. The symbiosis of these technologies creates a powerful platform for implementing complex digital twins with a high degree of autonomy and adaptability (Lee et al., 2024)

At the same time, the implementation of digital twins faces several challenges that are also the subject of scientific research. Among the key problems are ensuring data security, high development and implementation costs, and regulatory aspects. Data security is especially critical, as digital twins operate with large volumes of sensitive information that can become a target for cybercriminals. High implementation costs remain a significant barrier for many businesses, especially small and medium-sized enterprises (Van der Valk et al., 2021).

In the context of these studies and challenges, my work proposes an innovative approach to creating enterprise digital twins, distinguished by its holistic nature. Unlike most existing research, which focuses on creating digital twins of individual objects or business processes, the proposed concept views the enterprise as a single organism, all components of which are interconnected and interact with each other.

The key innovation of the proposed approach is the unification of accounting for all existing enterprise assets and the integration of these objects and subjects into a single graph structure, namely a multigraph. This structure not only reflects the connections between different elements of the enterprise but also explains the essence of their interactions. The multilayer architecture of the multigraph allows for describing various aspects of interactions between enterprise objects, including the intensity and frequency of communications.

An important feature of the proposed model is the ability of each digital twin of a specific object to initiate the launch of a business process. This creates a dynamic system where digital twins not only passively reflect the state of physical objects but also actively influence business processes. This approach ensures feedback, which is recorded in the accounting system, allowing the digital copy to perform certain tasks autonomously, without direct participation of the physical object.

Furthermore, the proposed concept opens up new possibilities for autonomous communication between enterprises. This could lead to revolutionary changes in the nature of intercorporate interaction and cooperation, allowing enterprises to collaborate more effectively to solve common tasks and optimize supply chains.

The potential of the proposed model to enhance enterprise management efficiency is significant. It can contribute to resource optimization, improve decision-making processes, and increase overall business operation efficiency. Moreover, this model opens up new avenues for research in the field of digital twins, artificial intelligence, and graph theory in the context of enterprise management.

Further research within this concept will focus on developing specific methodologies for its implementation. This includes addressing challenges related to

the creation and maintenance of complex multigraph structures.

An important aspect of future research is also addressing organizational challenges associated with implementing such a system in enterprises. This includes developing change management strategies, training personnel to work with the new system, as well as integrating digital twins into existing business processes and information systems of enterprises.

Particular attention should be paid to studying potential ethical aspects associated with the autonomy of enterprise digital twins. This includes questions of responsibility for decisions made by autonomous systems, ensuring transparency of decision-making algorithms, and protecting privacy and personal data in the context of deep digitalization of business processes.

If at first digital doubles were considered mainly as a tool for automation and increasing the efficiency of processes, with the development of the Industry 5.0 concept, the focus shifted to a human-centered approach (Wang et al., 2023).

A significant contribution to the development of the theory was made by research on human digital doubles (HDT), which are considered as a key method of implementing human-centricity in intelligent production systems. HDTs are a digital representation of people aimed at enhancing human capabilities, unlocking potential, and prioritizing physical and mental well-being in smart manufacturing systems.

This context emphasizes the need to develop new management models of business structures that take into account not only technical aspects, but also the human factor. It becomes important to create such management systems that would allow to harmoniously combine human abilities (creativity, flexibility of thinking, the ability to make decisions in conditions of uncertainty) with the capabilities of automated systems.

In this context, a holistic approach to the creation of digital doubles of the enterprise, which would take into account both technological aspects and people-centered principles of Industry 5.0, becomes particularly relevant. This approach has the potential to create more efficient and adaptive management systems that meet the modern challenges of the business environment.

## Conclusions

Thus, the proposed concept of a holistic approach to creating enterprise digital twins not only advances existing scientific developments in this field but also opens new perspectives for research and practical application of digital technologies in enterprise management. It has the potential to significantly impact business operation efficiency, intercorporate interaction, and the overall management paradigm in the era of digital transformation.

The use of multigraph structures to model relationships between various elements of the enterprise, including human capital, allows taking into account not only the technical aspects of the enterprise's functioning, but also social interactions, employee competencies and their development potential. This creates prerequisites for a deeper understanding of the processes taking place in the organization and making more informed management decisions.

## References

- Abanda, F. H., Jian, N., Adukpo, S., Tuhaise, V. V., & Manjia, M. B. (2024). Digital twin for product versus project lifecycles' development in manufacturing and construction industries. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02301-2>
- Barricelli, B., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, 7, 167653-167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- Kuehn, W. (2018). Digital twins for decision making in complex production and logistic enterprises. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 13(3), 260-271. <https://doi.org/10.2495/DNE-V13-N3-260-271>
- Lee, J., Chua, P. C., Liu, B., Moon, S. K., & Lopez, M. (2024). A hybrid Data-Driven optimization and Decision-Making approach for a digital twin environment: towards customizing production platforms. *International Journal of Production Economics*, 109447. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109447>
- Minhas, S. U. H., & Berger, U. (2014). Ontology based environmental knowledge management—A system to support decisions in manufacturing planning. In *Proceedings of the 6th International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development (KEOD)* (pp. 397-404). <https://www.scitepress.org/PublishedPapers/2014/51385/51385.pdf>
- Panetta, K. (2019). *Gartner top 10 strategic technology trends for 2019*. Gartner. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/>
- Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 6, 3585-3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Tague, N. R. (2005). *The quality toolbox* (2nd ed.). ASQ Quality Press. <https://books.google.com.ua/books?vid=ISBN9780873896399>
- Tapscott, D. (1995). *The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence*. McGraw-Hill. <https://books.google.com.ua/books?vid=ISBN0070633428>
- Van der Valk, H., Haße, H., Möller, F., & Otto, B. (2021). Archetypes of Digital Twins. *Business & Information Systems Engineering*, 64(3), 375–391. <https://doi.org/10.1007/s12599-021-00727-7>
- Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., Yuan, Y., Wuest, T., Yang, H., & Wang, L. (2023). Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 85, 102626. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102626>

# Financial and Economic Consequences of the War for Ukraine

Olena Lytvyn 

**Purpose.** The article explores the financial and economic consequences of the war with the Russian Federation for Ukraine. The focus is on assessing how businesses, government and other international stakeholders have responded to the various challenges posed by the war. **Design / Method / Approach.** According to the World Bank's RDNA3 methodology, damage is the direct costs of destroyed or damaged physical assets and infrastructure, valued in monetary terms. **Findings.** Businesses note the shortage of labor, rising wages in the market and the overall economic prospects of Ukraine as significant risks to their recovery. They identify the priorities related to government policy and the business ecosystem. **Theoretical Implications.** Companies demonstrate a cautious view of the country's economic outlook and prospects, explaining this by the unpredictable situation, insufficient demand, and labor shortages. Most of the companies that have already optimized their staff do not intend to reduce it further, seeing human resources as a prerequisite for a gradual economic recovery. **Practical Implications.** Most of the Ukrainian companies focus on the domestic market, with a limited presence on foreign markets. They report losses of up to 100 USD thousand. The scale of financial losses varies across sectors, with the construction sector suffering the most and the least, agriculture, telecommunications, marketing, consulting and design services. **Originality / Value.** Despite unprecedented losses and challenges due to the war, Ukraine has managed to maintain relative macroeconomic and price stability and overcome significant production difficulties and the negative effects of labor outflows and labor migration. **Research Limitations / Future Research.** Future significant research must be focused on rebuilding a critical infrastructure damaged by the hostilities and enabled a comprehensive reconstruction in Ukraine. **Paper Type.** Analytical Paper.

## Keywords:

financial and economic consequences, war, infrastructure, business, economic recovery, negative effect, migration

## Contributor Details:

Olena Lytvyn, Cand.Sc., Assoc.Prof., Taras Shevchenko National University of Kyiv: Kyiv, UA, [kafedra\\_mm@ukr.net](mailto:kafedra_mm@ukr.net)





The Ukrainian economy has remained resilient due to the joint efforts of the government, business, the rapid recovery of destroyed and damaged critical infrastructure, and continued financial support from international support from international partners.

Despite the devastating impact of the war, economy demonstrated exceptional resilience. Shortly after the shock of the Russian invasion, businesses began to adapt to the new economic situation. Since the start of the full-scale invasion, 64 percent of businesses have temporarily suspended or curtailed their operations. However, the vast majority have resumed their operations. In October 2023 only 9.6 percent of companies that suspended their operations were at risk of ceasing operations entirely (World Bank, 2024a).

Companies demonstrated a cautious view of the country's economic outlook and prospects, explaining this by the unpredictable situation, insufficient demand, and labor shortages. The majority of the companies that have already optimized their staff did not intend to reduce it further, seeing human resources as a prerequisite for a gradual economic recovery in 2024. Most of the companies have significant unused capacity, which planned to start gradually utilizing them in 2024. Despite the ongoing war, businesses have successfully adapted to the situation and maintained financial stability. Although, companies needed additional funding, they were cautious about attracting new investments due to the unpredictability of further developments.

The security situation was recognized as the main factor influencing the decision to relocate. Business owners and managers expected a quick return to the abandoned regions after the end of the war. There were significant regional differences in the impact of the war on the companies. Enterprises in the eastern and southern regions of Ukraine suffered losses about 1.5 times more than in the west of the country. Despite this, businesses in eastern Ukraine expressed optimism and positive expectations about their prospects for recovery in 2024. Most of the companies focused on the domestic market, with limited presence on foreign markets. They reported losses of up to 100 USD thousand. The scale of financial losses varied across sectors, with the construction sector suffering the most and the least, agriculture, telecommunications, marketing, consulting and design services (World Bank, 2024a).

Businesses noted the shortage of labor, rising wages in the market and the overall economic prospects of Ukraine as significant risks to their recovery. They identified the following priorities related to government policy and the business ecosystem: improving the legal and regulatory framework, expanding access to finance and markets, and harmonizing legislation and standards with the European Union, addressing the root causes of low economic development and promoting entrepreneurship.

## **Objective and Tasks**

The article explores how the consequences of the war have affected the activities of micro, small and medium-sized businesses in Ukraine, as well as their status at the end of 2024. In addition, the assessment provides important

information about the financial and economic consequences of the war in the context of their regional presence, given that the regions of Ukraine have been affected by the hostilities to varying degrees. The focus of the article was on assessing how businesses, government and other international stakeholders have responded to the various challenges posed by the war, including disruptions in logistics chains, forced displacement of people, changes in trade and transportation routes, etc.

The assessment highlights the main obstacles, problems and risks that hinder business development. It also analyzes the effectiveness of government programs aimed at stimulating the economy from the perspective of a business, as well as the needs and priorities of businesses for the post-war recovery of Ukraine, which can have a significant impact on the society as a whole.

## Materials and Methods

According to the World Bank's Rapid Damage and Needs Assessments (RDNA3) methodology, damage is the direct cost of destroyed or damaged physical assets and infrastructure, valued in monetary terms. Costs are estimated based on replacing or repairing physical assets and infrastructure, considering the replacement price prevailing before the war. The data cut-off for RDNA3 was on December 31, 2023. The loss is a change in economic flows resulting from the war, valued in monetary terms. Examples include increased operating costs and loss of revenue for authorities and private sector (World Bank, 2024a).

According to the RDNA3 methodology, needs are the value associated with the resumption of prewar normality through activities, such as: repair and restoration, including a premium linked to build back better principles. They included improved energy efficiency, modernization efforts, and sustainability standards — as well as factors such as global inflation, surge pricing due to volume of construction, higher insurance, and so forth. Needs are expressed in monetary terms according to market prices prevailing as of December 31, 2023. Needs did not equal the sum of damage and losses. Needs met were discounted as relevant.

As for the recovery and reconstruction financing priorities for 2024, they refer to recovery and reconstruction needs identified by GoU line ministries that are considered highest priority for urgent delivery and require funding in 2024. Investment priorities account for both capital and current expenditures and consider expenditures that would be made by central and local governments, by state-owned enterprises (SOEs), by the private sector (including households), or by other actors (e.g., development partners).

The RDNA3 also includes short-term priorities identified by Ukrainian line ministries that need financing in 2024. These priorities have been defined by line ministries through an ongoing process of project development and monitoring and involving extensive consultations with development partners. Sectoral priorities, to be monitored and refined over time, are intended to inform investment planning, mobilization of resources, and implementation. The RDNA3 also includes an overview of key requirements to facilitate more effective and efficient recovery and reconstruction planning and implementation (World Bank, 2024a).

Some institutional and policy reforms have been implemented to support the recovery and reconstruction process. The Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development (MCTID or Ministry of Recovery) facilitates coordination and efficient reconstruction of war-affected regions.

Territorial communities are responsible for developing planning documents, establishing communication with international partners, and implementing restoration projects in their respective territories. The European Commission proposed a multi-annual instrument to support Ukraine between 2024 and 2027. This was the Ukraine Facility, which aimed at supporting the state's basic needs as well as Ukraine's recovery, reconstruction, and modernization, in part through catalyzing of private sector investment tied closely to Ukraine's EU path (European Commission, 2023).

The UN had a strong focus on supporting the inclusion of marginalized groups and seeks to ensure that the recovery process benefits those farthest behind, reduces inequalities, and promotes social cohesion and livelihoods. In collaboration with the GoU and MCTID, the UN in Ukraine has established a flexible Ukraine Community Recovery Fund. The fund supported communities that are driving their own recovery efforts in targeted communities to reduce current and prevent future humanitarian needs; to rebuild the social and economic fabric; and to provide the conditions for people to voluntarily return to their homes and rebuild their lives. These community-focused early recovery efforts set in the nexus of humanitarian, recovery, and social cohesion interventions (United Nations in Ukraine, 2023).

In December 2022, the Ukraine Relief, Recovery, Reconstruction and Reform Trust Fund (URTF) was set up by the World Bank to channel donor support. The URTF provides a coordinated financing and support mechanism that helps the GoU sustain its administrative and service delivery capacity, conduct relief efforts, and plan and implement Ukraine's reconstruction and reform agenda.

The URTF was financing projects with a focus on repairing damaged infrastructure, restoring public services, and sustaining economic activities in the areas of health care, energy, logistics, agriculture, and housing. As of January 2024, URTF was over 1.5 USD billion in contributions from 14 donor countries, making grants to support early recovery and administrative capacity of the government. The multisectoral support provided by the World Bank during the war built on a decades-long development partnership and set the stage for resilient reconstruction when peace returns.

It is important for us to pay attention to the national peculiarities of the codification of collective memory through individual experience and life stories during the full-scale military aggression against Ukraine, and to show the newest forms of presenting the evidence of war (Hudoshnyk & Krupskyi, 2023).

## Results

Despite unprecedented losses and challenges due to the war, Ukraine managed to maintain relative macroeconomic and price stability and overcome significant production difficulties and the negative effects of labor outflows and labor

migration. According to preliminary data from the Ministry of Economy of Ukraine, overall GDP growth in 2023 was estimated at around 5 percent, which was a significant improvement compared to the 28.8 percent decline in 2022. Several factors, such as: improvements in the energy sector and external financial assistance from international partners were contributing to the GDP recovery (Government Portal, 2022).

The fastest recovery rates were observed in the following sectors as: construction, agriculture, domestic trade, and manufacturing industry. As for the construction, significant funding has been allocated to rebuild a critical infrastructure damaged by the hostilities and enable a comprehensive reconstruction. According to the State Statistics Service, the construction sector experienced a significant growth, increasing by 20.9 percent in the first nine months of 2023 compared to the same period in 2022.

As for the domestic trade, it demonstrated an increase in consumer demand and supply of goods and the retail trade turnover increased by 11.6 percent. As for agriculture, favorable weather conditions contributed to an increase in yields and harvested areas of almost all crops. In addition, the partial recovery of exports in this sector was facilitated by the opening of trade routes. According to the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine, the grain harvest as of January 11, 2024, was 15% higher than in the corresponding period of 2023 (World Bank, 2024b).

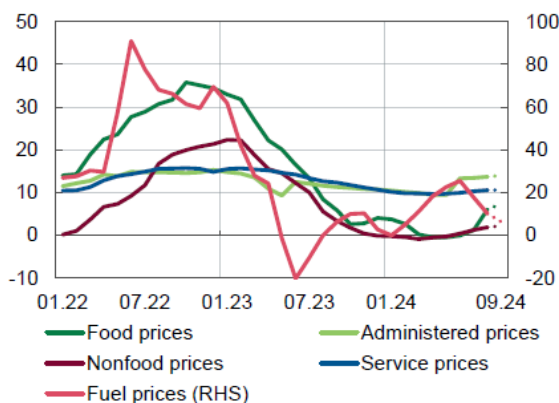
As for the manufacturing industry, its recovery was explained by growing demand for engineering and construction materials. There was an increase in the raw material base of agriculture, in particular, the production of food, beverages, and tobacco products, as well as demand from related activities. In general, industrial production grew by 2.4 percent and in the manufacturing by 8 percent. In the manufacturing industry, the highest growth rates were observed in machine building products (15.3 percent); production of furniture and other products (15.2 percent); rubber and plastic and other non-metallic mineral products (16.4 percent); food, beverages and tobacco products (11.6 percent) and chemical products (12.2 percent).

The growth in food prices accelerated sharply in August 2024, as prices for raw foods started to grow again amid reduced food supply caused by unfavorable weather conditions. Prices for processed foods also rose at a faster pace, both due to the second-round effects of higher costs of raw food inputs and further increase in businesses' costs for energy and labor. The growth in prices for most nonfood products accelerated, largely driven by the exchange rate factor. Meanwhile, clothing and footwear prices declined faster, likely due to growing competition between imports and products made in Ukraine. The growth in prices for services picked up slightly, being under pressure from business production costs (World Bank, 2024b).

In the first half of 2024, Ukraine's economy demonstrated a significant adaptability. It didn't only withstand the unprecedented challenges of war and electricity shortages, but also continued to recover. The macrofinancial stability ensured by the NBU and government decisions and significant international support was the basis for adaptation. Thus, inflation fell to 3.2% in March 2024 and has remained moderate since then, despite accelerating. Underlying inflationary

pressures also intensified in August 2024. Core inflation accelerated to 6.5% yoy, up from 5.7% yoy in July. These dynamics were slightly ahead of the trajectory in the NBU's July forecast, caused primarily by a faster rise in the prices of processed foods due to the second-round effects of higher raw material prices and production costs, including for energy and labor. However, inflation expectations remained generally stable (World Bank, 2023).

According to NBU's estimates, inflation accelerated further in September 2024. The budget deficit has been financed without any hryvnia issuance, and international reserves were at sufficient levels. However, the war was ongoing, which means that risks and challenges remained.

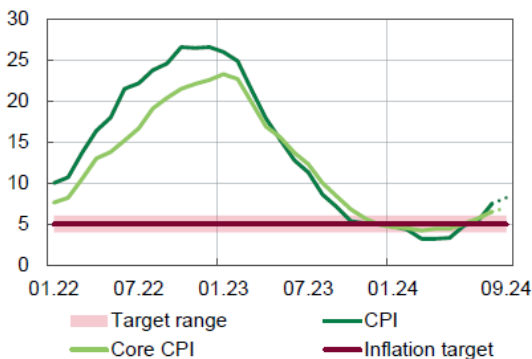


\* Data for September reflects nowcast.

**Figure 1 – CPI components\*, % yoy (SSSU, NBU)**

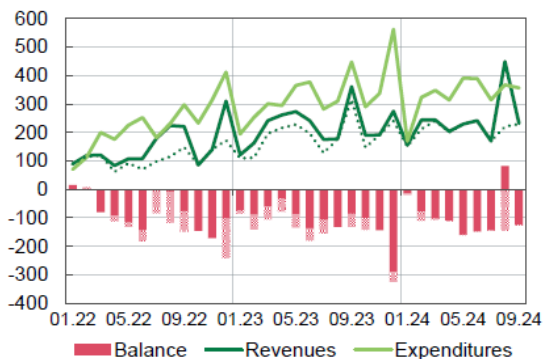
The state budget deficit (excluding grants in revenues) decreased somewhat compared to the previous months 2024 but remained, expectedly, quite significant. In September 2024, the budgetary needs were financed mainly using accumulated funds from the substantial international aid received in August 2024. Meanwhile, the domestic debt market revived in September. Placements of domestic government securities in both national and foreign currencies were the largest since the beginning of the year, supported by NBU's additional measures to stimulate investments in government securities and a moderate increase in their yields. The total rollover of domestic government securities in nine months was around 160 percent (United Nations in Ukraine, 2023).

The NBU assumed a gradual normalization of economic conditions. However, the risks associated with the course of the war were crucial to our forecast. A prolonged, high-intensity war would limit economic potential, put pressure on prices, and result in higher budgetary needs. This would increase uncertainty and risks. The destruction of housing infrastructure, children's hospitals, and energy terror all seemed impossible (National Bank of Ukraine, 2024).



\* Data for September reflects nowcast.

**Figure 2 – Inflation\* and inflation target, % yoy (SSSU, NBU)**



**Figure 3 – Main state budget indicators (monthly), UAH billions (SSSU, MFU, NBU)**

According to the NBU, the second assumption of the forecast was that international assistance would continue. Ukraine remained dependent on it. On the contrary, Ukraine exceeded expectations in terms of consolidating its capabilities, implementing reforms, and fulfilling its commitments. Funding needs were determined by the war unleashed by the Russian Federation. It led to a huge increase in budget expenditure. It would be very difficult to cover a significant part of 2024 year’s deficit (about 38 USD billion) without external financial assistance, despite the successes in revitalizing the domestic debt market, increasing the tax base and the accumulated safety margin. And Ukrainian government was grateful to the EU, the US, the IMF and other partners for the already approved support programs. It was crucial for Ukraine to receive at least 31 USD billion and 21 USD billion in 2025 and 2026, respectively.

Unfortunately, due to bureaucratic compliance with lending principles, procedures, and requirements (project objective, co-financing requirements, technical

expertise, procurement procedures, complex and time-consuming procedures for entering into loan agreements, etc.), the aid that came to Ukraine was uneven in time and does not match the level of stated needs (Kurnosenko, 2022).

The key risks of economic development and financial and investment processes in Ukraine are as follows: slow economic recovery due to the destruction of energy, industrial, socio-economic infrastructure, loss of part of the production and labor potential, high unemployment, low and distorted consumer demand, aggravation of crisis trends in the global economy, in particular in the energy sector and financial markets, which together affect the amount of international financial support for Ukraine; tight domestic monetary policy and a narrowing of bank lending to businesses; cuts in government support programs and a drop in tax revenues; deterioration in the fiscal sustainability of public finances and the high cost of domestic government borrowing, and man-made disasters (Близнюк & Іванюта, 2023). Otherwise, the financial mechanisms for recovering from military conflicts and stimulating competitive economic development are determined by a set of strategic instruments. In this context, the main factors are the efficient use of public and private financial resources, the introduction of innovative financial instruments, and the development of transparent governance mechanisms. In addition, promoting social inclusion, sustainable development, and attracting international investment are key to a successful path to recovery and competitive economic growth.

In addition, an important component of the fiscal mechanism is the development of effective social protection and education programs aimed at restoring and developing human capital. Creating a favorable investment environment and improving financial legislation can help make the country more attractive to foreign investors. In addition, it is important that the government, business, and civil society actively cooperate to jointly implement recovery and development strategies (Borovkov, 2023).

The forms of implementation of the regional development strategy are the adoption of an investment program (a set of interrelated tasks and measures of a short-, medium-, and long-term nature to achieve certain goals) and an investment project (an official document that defines the actions of its participants and the resources necessary to achieve its goals within the established timeframe). The requirements for the compliance of the mechanisms of financing the state regional policy with the requirements of the Budget and Tax Codes of Ukraine are: transfers to local budgets from the state budget; public-private partnership, etc. (Kosova, 2023).

Moreover, the following steps will help to create a more secure, efficient, and resilient financial environment that takes into account the challenges and opportunities brought by digital innovations after the war (Lytvyn et al., 2024), as:

1. Develop and implement clear regulations to safeguard data confidentiality and ensure cybersecurity.
2. Participate in international initiatives and collaborate with other countries to develop standards.
3. Promote the development of technical skills and scientific research to ensure competitiveness in the digital era.

4. Ensure equal access to fintech tools and technologies in all regions.
5. Engage in dialogue with international and local regulators to develop flexible rules that consider the innovative nature of fintech projects.

As part of the sustainable development, post-war companies should increase their activities in the field of renewable energy and ecology, as well as support environmental projects in any way possible, thus contributing to the achievement of the 6th, 7th and 13th Global Goals for Sustainable Development, which the United Nations has set for 2015. Ukrainian companies should be aware of their environmental impact and strive to reduce it by developing their sustainability orientation, including sustainable business and sustainable management (Lytvyn et al., 2023).

Nowadays, companies and individuals who want to start or support sustainable projects in Ukraine face two major challenges: lack of support from local and state authorities; and inefficient and ineffective legal framework and policies, e.g. lack of laws and regulations on environmental protection, lack of fiscal, economic and industrial policies in the field that would facilitate the implementation and operation of green initiatives. In addition to the war, businesses face problems in attracting investment, corporate, tax and intellectual property issues. Despite these problems, business should support the following sectors: renewable energy, low-carbon transportation, low-carbon buildings, sustainable water and waste management, sustainable land use, and climate change. In our opinion, Ukraine will need 5-7 years to recover the potential lost during the war (Lytvyn et al., 2023).

## Conclusions

Two-thirds of Ukrainian small and medium-sized enterprises were forced to fully or partially cease operations during the full-scale invasion. At the same time, 36.5 percent of businesses managed to continue working without interruption, and 6 percent were forced to stop for a year or more. Enterprises currently have significant unused capacity, which were planned to start using in 2024. Despite the ongoing war, the business community adapted to the situation, ensuring financial stability. There has been no massive relocation of businesses from the war-affected areas to other regions of Ukraine. Entrepreneurs considered security as the main factor for relocation. Therefore, they expected a quick return to the de-occupied territories after the war ended. Despite the security uncertainty, Ukraine has the potential to accelerate its development by improving the efficiency of the existing level of its economy, reducing the size of the shadow economy and creating favorable conditions for doing business. The planned integration with the EU could also accelerate the convergence of income levels with those of EU member states by 2030 – 2050, creating significant incentives for economic development.

## References

- Centre for Economic Recovery (CER) and Advanter Group. (2024). *Assessment of the Impact of the War on Micro-, Small-, and Medium-sized Enterprises in Ukraine* (pp. 3–29). United Nations Development Programme.



- <https://www.undp.org/ukraine/publications/assessment-wars-impact-micro-small-and-medium-enterprises-ukraine>
- European Commission. (2023). *Questions and Answers – A New Ukraine Facility*. European Commission. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_23\\_3353](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_23_3353)
- Government Portal. (2022). *Oleksandr Kubrakov appointed Deputy Prime Minister for Restoration of Ukraine – Minister for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine*. Government Portal. <https://www.kmu.gov.ua/en/news/oleksandra-kubrakova-pryznacheno-vitse-premier-ministrom-z-vidnovlennia-ukrainy-ministrom-rozvytku-hromad-terytorii-ta-infrastruktury-ukrainy>
- Hudoshnyk, O., & Krupskiy, O. (2023). Practices of using Rapid Response Collecting by Ukrainian museums in wartime. *Muzeológia a Kultúrne Dedičstvo*, 11(2), 5–16. <https://doi.org/10.46284/mkd.2023.11.2.1>
- Kurnosenko, L. (2022). Проблеми та особливості міжнародної фінансової підтримки України в умовах війни. *Public administration and regional development*, (15), 255–274. <https://doi.org/10.34132/pard2022.15.13>
- Lytvyn, O., Kudin, V., Onyshchenko, A., Nikolaiev, M., & Chaplynska, N. (2024). Integration of digital means in the financial sphere: the potential of cloud computing, blockchain, big data and AI. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 1(54), 127–145. <https://doi.org/10.55643/fcaptop.1.54.2024.4257>
- Lytvyn, O., Onyshchenko, A., & Ostapenko, O. (2023). Economic challenges of sustainable development goals in Ukraine. *Baltic Journal of Economic Studies*, 9(1), 100–112. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2023-9-1-100-112>
- National Bank of Ukraine. (2024). *Macroeconomic and Monetary Review*. Official website of the National Bank of Ukraine. <https://bank.gov.ua/en/news/all/makroekonomichnyy-ta-monetarniy-oglyad-jovten-2024-roku>
- United Nations in Ukraine. (2023). *Concept note “Ukraine Community Recovery Fund”*. United Nations in Ukraine. <https://ukraine.un.org/en/237285-concept-note-ukraine-community-recovery-fund>
- World Bank. (2023). *The World Bank and Ukraine: Laying the Groundwork for Reconstruction in the Midst of War*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/results/2023/11/30/the-world-bank-and-ukraine-laying-the-groundwork-for-reconstruction-in-the-midst-of-war>
- World Bank. (2024a). *Ukraine - Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3) : February 2022 - December 2023 (English)*. World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099021324115085807/P1801741bea12c012189ca16d95d8c2556a>
- World Bank. (2024b). *Ukraine Relief, Recovery, Reconstruction and Reform Trust Fund (URTF)*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/programs/urtf>
- Близнюк, О. П., & Іванюта, М. О. (2023). Стан та тенденції розвитку фондового ринку України в умовах протистояння викликам війни. In *Фінансова архітектура та сценарії конкурентних моделей розвитку* (pp.19–22). ДБУ. <https://repo.btu.kharkov.ua//handle/123456789/44124>
- Боровков, Є. Т., & Горох, О. В. (2023). Фінансові механізми забезпечення повоєнного відновлення та конкурентного розвитку економіки. In *Фінансова архітектура та сценарії конкурентних моделей розвитку* (pp. 29–30). ДБУ. <https://repo.btu.kharkov.ua//handle/123456789/44129>
- Косова, Т. Д., Федосенко, А. Л., & Федосенко, П. Л. (2023). Проблеми розробки і реалізації фінансово-інвестиційної політики в умовах післявоєнного відновлення економіки. In *Фінансова архітектура та сценарії конкурентних моделей розвитку* (pp. 41–44). <https://repo.btu.kharkov.ua//handle/123456789/44164>

# Роль емоційного інтелекту та професійної культури у розвитку закладів вищої освіти

Юлія Стасюк , Ірина Вайнілович ,  
Андрій Кобченко 

**Purpose.** This study analyzes the role of emotional intelligence (EI) in shaping effective development strategies for higher education institutions (HEIs), emphasizing professional culture. It seeks to determine how EI strengthens institutional dynamics, enhances team management, and promotes an inclusive environment. **Design / Method / Approach.** A mixed-methods approach examines the benefits of EI in higher education. Using qualitative and quantitative data, the study incorporates insights from experts and recent research to provide a comprehensive view of EI and professional culture interaction within HEIs. **Findings.** Findings reveal a strong correlation between high EI levels and improved institutional outcomes. Leaders with advanced EI foster open communication, understand team and student needs, and cultivate collaboration. A professional culture centered on EI offers HEIs a strategic advantage in today's educational landscape. **Theoretical Implications.** This research enhances understanding of EI as a critical competency in educational leadership, essential for fostering positive professional culture and driving institutional success. Integrating EI into leadership practices builds an adaptable, cohesive environment conducive to personal and academic growth. **Practical Implications.** The study provides actionable insights for HEIs seeking to improve team dynamics and institutional culture, including EI-based training programs, prioritizing EI in hiring, and encouraging professional development. **Originality / Value.** This article bridges the gap between EI theory and its practical application in HEIs, emphasizing relevance to leadership and professional culture. **Research Limitations / Future Research.** Limitations include potential biases in self-reported EI data and the need for longitudinal studies to examine EI's lasting impact on culture. Future research should explore diverse cultural settings to better understand EI's role in various educational contexts. **Paper Type.** Review Paper.

## Keywords:

emotional intelligence, higher education development, professional culture, institutional resilience, student engagement, leadership, educational strategy

## Contributor Details:

Yuliia Stasiuk, Sr.Lect., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [stasiuk\\_yu@365.dnu.edu.ua](mailto:stasiuk_yu@365.dnu.edu.ua)

Iryna Vainilovych, Postgraduate Student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [vainilovych-i@365.dnu.edu.ua](mailto:vainilovych-i@365.dnu.edu.ua)

Andrii Kobchenko, Sr.Lect., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [kobchenko\\_a@365.dnu.edu.ua](mailto:kobchenko_a@365.dnu.edu.ua)



Розвиток закладів вищої освіти еволюціонував у відповідь на мінливі суспільні потреби, підкреслюючи важливість емоційного інтелекту (EI) та професійної культури у створенні сприятливого навчального середовища. Оскільки традиційні освітні практики зміщуються в бік більш інклюзивних та інноваційних підходів, інтеграція емоційного інтелекту стала ключовим елементом у підвищенні залученості студентів, академічної успішності та загального благополуччя. Цей фокус відображає ширше розуміння важливості соціальних та емоційних навчальних компетенцій, особливо в різноманітних освітніх контекстах, де нетрадиційні учні все частіше складають студентську аудиторію (Lynch, 2016; Elmi, 2020; Cunha & Krupskiy, 2024).

Помітні суперечності навколо сучасних підходів включають напругу між підтримкою усталених культурних практик і прийняттям необхідних інновацій, що може призвести до опору як з боку викладачів, так і з боку адміністрації (Vivek & Krupskiy, 2024). Інституційна політика та обмеженість ресурсів ще більше ускладнюють впровадження емоційно-інтелектуальної педагогіки та культури викладання, часто перешкоджаючи ефективності освітніх реформ. Крім того, дослідження підкреслюють помірно сильну кореляцію між емоційним інтелектом та академічною успішністю, що ставить під сумнів адекватність поточних навчальних програм для розвитку цих важливих компетенцій серед учнів та педагогів (Rosowsky & Hallman, 2020; Khassawneh et al., 2022; Landry, 2021). Але у закладах освіти більше уваги приділяють інформаційній компетентності, ніж емоційній (Крупський & Стасюк, 2010).

Оскільки навчальні заклади намагаються адаптуватися, пріоритетними стають науково обґрунтовані практики та стратегії співпраці, які сприятимуть формуванню міцної культури викладання, що підтримує розвиток як викладачів, так і студентів. Центри викладання і навчання (Centers for Teaching and Learning – CTLs) та розробники освітніх програм відіграють важливу роль у сприянні цьому переходу, надаючи ресурси та підтримку для вдосконалення педагогічних методів та інституційної взаємодії (Lee, 2024; McDonald, 2021). Майбутня траєкторія розвитку вищої освіти, ймовірно, вимагатиме постійного акценту на емоційному інтелекті та професійній культурі для створення більш ефективних, інклюзивних і стійких навчальних середовищ (Sánchez-Álvarez et al., 2020; Shaw et al., 2021).

## **Мета та завдання дослідження**

Метою даного дослідження є визначення ролі емоційного інтелекту у формуванні стратегій розвитку закладів вищої освіти, з акцентом на розвиток професійної культури. Дослідження спрямоване на виявлення того, як EI впливає на покращення внутрішньої динаміки установи, управління командами та створення інклюзивного середовища, що підтримує академічні та соціальні потреби як студентів, так і персоналу.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– проаналізувати, як емоційний інтелект впливає на внутрішні процеси управління у закладі вищої освіти (ЗВО).

- визначити зв'язок між високим рівнем емоційного інтелекту керівників та результативністю колективної роботи в освітньому середовищі.
- дослідити, як професійна культура, заснована на ЕІ, сприяє підвищенню залученості студентів та задоволеності персоналу.
- запропонувати шляхи щодо впровадження тренінгів з розвитку ЕІ для керівного складу ЗВО.
- розглянути можливості застосування ЕІ у різних культурних контекстах, щоб підвищити ефективність роботи ЗВО.

## Методи

У дослідженні використовувався комплексний підхід, що включає огляд літератури та аналіз документів, пов'язаних із розвитком закладів вищої освіти та застосуванням емоційного інтелекту у керівництві. Основою для аналізу стали роботи провідних дослідників з тем емоційного інтелекту та професійної культури, що дозволило розглянути ключові аспекти ЕІ у контексті управління ЗВО.

Також було проведено аналіз документів та внутрішніх політик деяких ЗВО для вивчення реальних підходів до впровадження ЕІ у практичну діяльність і формування професійної культури. Цей методологічний підхід дозволив виявити основні тенденції та чинники, що сприяють успішному формуванню професійної культури та розвитку керівних стратегій на основі емоційного інтелекту.

## Емоційний інтелект у вищій освіті

Еволюція вищих навчальних закладів була тісно переплетена із суспільними та культурними змінами, які вплинули на їхній розвиток та роль, яку вони відіграють у суспільстві. Культурні перспективи суттєво впливають на те, як люди обробляють інформацію та взаємодіють зі світом (Lynch, 2016). Це особливо актуально в контексті вищої освіти, де сходяться люди з різним походженням і різними культурними лінзами. Протягом багатьох років коледжі та університети прагнули адаптуватися до мінливих суспільних потреб, підкреслюючи важливість співпраці та інклюзивності у своїх педагогічних підходах. Історично склалося так, що навчальні заклади часто зосереджувалися на традиційному академічному успіху, але зараз спостерігається помітний зсув у бік визнання важливості компетентностей соціально-емоційного навчання (СЕН). Впровадження СЕН у навчальні програми має важливе значення для подолання зростаючого розмаїття серед учнів, у тому числі з нетрадиційним походженням та з обмеженими можливостями (Elmi, 2020). Така інклюзивність сьогодні розглядається як наріжний камінь освітньої практики, що дозволяє навчальним закладам обслуговувати ширший демографічний контингент і покращувати загальний освітній досвід. Зростання кількості дорослих учнів і студентів з різним походженням відображає значну трансформацію в ландшафті вищої освіти. Заклади почали приймати ці

зміни, відходячи від жорстких історичних практик до більш інноваційних і гнучких підходів, які визнають різноманітні потреби своїх студентських груп. Цей зсув віддзеркалюється у викликах, з якими стикаються розробники освітніх програм, перед якими стоїть завдання впливати на інституційні зміни в умовах різних пріоритетів і традиційних практик (Khassawneh et al., 2022). У цьому контексті емоційний інтелект став критично важливим компонентом успішного освітнього середовища. Він охоплює не лише здатність керувати власними емоціями, але й розуміти емоційні переживання інших та взаємодіяти з ними, сприяючи таким чином створенню більш емпатійної та спільної навчальної атмосфери (Landry, 2021; Lee, 2024). Взаємозв'язок між емоційною компетентністю та лідерством є важливим елементом для успішної педагогічної діяльності (Крупський та Кіба, 2012). Таким чином, сучасні освітні практики все частіше надають пріоритет розвитку емоційного інтелекту поряд із традиційними академічними навичками, що відображає більш цілісний підхід до розвитку учнів, який відповідає сучасним суспільним цінностям. Ця історична траєкторія ілюструє динамічну взаємодію між культурою, педагогікою та емоційною компетентністю у сфері вищої освіти.

Емоційний інтелект став важливим компонентом сучасних підходів до вищої освіти, особливо в контексті створення сприятливого навчального середовища. Розвиток ЕІ передбачає такі навички, як самосвідомість, активне слухання та здатність співпереживати іншим (McDonald, 2021). Ці компетенції не лише покращують комунікацію між педагогами та учнями, а й сприяють спільному та цікавому освітньому досвіду.

Створення культури, яка цінує викладання і навчання, є важливим для ефективної вищої освіти. Центри викладання та навчання відіграють ключову роль у цьому процесі, пропонуючи ресурси та підтримку викладачам і співробітникам для вдосконалення їхньої педагогічної практики. Наприклад, STL Віндзорського університету надає послуги, пов'язані з розробкою навчальних програм, оцінюванням викладання та активними навчальними просторами, тим самим сприяючи створенню середовища, сприятливого для інновацій у викладанні. Аналогічно, комітети партнерства у сфері викладання та навчання в таких установах, як Університет Макмастера, сприяють широкому залученню до освітніх ініціатив, залучаючи викладачів, співробітників та студентів до обговорення практик викладання (Shaw et al., 2021). Ці спільні зусилля заохочують спільну відповідальність і створюють спільноту підтримки навколо викладання.

Щоб покращити якість викладання, багато закладів запровадили практики та структури, що ґрунтуються на фактах. Система ІТСПС (Institutional Teaching Culture Survey) визначає конкретні важелі, які впливають на культуру викладання в навчальному закладі, включаючи пріоритетність ефективного викладання, конструктивні практики оцінювання та визнання досконалості викладання (Shaw et al., 2021). Впроваджуючи заходи, узгоджені з цими важелями, заклади можуть підвищити свою освітню культуру та вирішити унікальні проблеми, з якими вони стикаються. Наприклад, викорис-

тання інфраструктури для підтримки викладання є життєво важливим, оскільки це гарантує, що викладачі мають ресурси, необхідні для ефективного викладання.

Незважаючи на важливість цих сучасних підходів, вищі навчальні заклади часто стикаються з опором змінам, який може випливати з глибоко вкорінених традицій і практик (Rosowsky & Hallman, 2020). Подолання цього опору вимагає тонкого розуміння інституційної культури та готовності адаптувати існуючі практики до сучасних цінностей. Заклади заохочуються до зміни нарративу зі спадщини історичних практик на далекоглядну філософію, яка надає пріоритет інноваціям та прогресивним методикам викладання. Така культурна навігація має важливе значення для створення середовища, яке підтримує як академічний успіх, так і розвиток емоційного інтелекту як серед студентів, так і серед викладачів.

Емоційний інтелект відіграє важливу роль у контексті вищої освіти, впливаючи як на академічну успішність, так і на психологічне благополуччя студентів. Література вказує на те, що люди з вищою здатністю обробляти емоційну інформацію, як правило, краще виконують когнітивні завдання, що особливо актуально під час складних етапів навчання в університеті (Sánchez-Álvarez et al., 2020). EI охоплює як внутрішньоособистісні, так і міжособистісні навички, які необхідні для орієнтації в соціальній динаміці та стресах, що переважають в академічному середовищі, особливо в підлітковому віці, коли студенти стикаються зі значними змінами.

Дослідження показують, що емоційний інтелект значною мірою корелює з академічною успішністю. Студенти, які мають вищий рівень EI, демонструють кращу саморегуляцію, емоційну обізнаність та здатність вирішувати проблеми, що сприяє їхній здатності ефективно справлятися з академічним тиском (Shengyao et al., 2024). Крім того, добре розвинене EI може підвищити мотивацію студентів, дозволяючи їм зберігати зосередженість і відданість навчанню навіть тоді, коли вони стикаються з перешкодами.

Взаємозв'язок між емоційним інтелектом і життєстійкістю також заслуговує на увагу. Життєстійкість, яка визначається як здатність студента долати труднощі, зберігаючи при цьому академічну успішність, перебуває під сильним впливом емоційного інтелекту. Студенти з високим EI можуть ефективніше справлятися зі стресом і краще шукати соціальної підтримки, що є життєво важливим для підтримки життєстійкості перед обличчям академічних труднощів (Sánchez-Álvarez et al., 2020; Shengyao et al., 2024).

Кілька досліджень припускають, що мотивація, самоефективність і життєстійкість слугують факторами-посередниками у взаємозв'язку між емоційним інтелектом та академічною успішністю. Наприклад, підвищений емоційний інтелект може призвести до посилення мотивації, що згодом покращує як психологічне благополуччя, так і академічну успішність (Shengyao et al., 2024). Це свідчить про те, що розвиток емоційного інтелекту в рамках освітніх програм може не лише покращити емоційне та соціальне функціонування студентів, але й опосередковано підвищити їхні академічні результати за рахунок підвищення рівня мотивації.

## Професійна культура у вищій освіті

Професійна культура у вищих навчальних закладах охоплює спільні цінності, переконання та практики, які формують освітнє середовище для викладачів, співробітників та студентів. Ця культура суттєво впливає на інституційний підхід до викладання, навчання та загального залучення студентів, тим самим впливаючи на ключові результати, такі як навчання студентів, утримання студентів та задоволеність професорсько-викладацького складу (Shaw et al., 2021). В основі професійної культури лежить інституційна культура викладання, яка відображає вкорінені моделі та ідеології викладання, що існують у вищій освіті. Ця культура не є статичною; вона розвивається у відповідь на різні фактори, включаючи зміни в інституційних пріоритетах, суспільних вимогах та досвіді її членів (Shaw et al., 2021; Elmi, 2020). Культура викладання проявляється через різні мікрокультури, які існують на рівні кафедр або факультету, кожна з яких робить свій внесок у більшу інституційну культуру, а також має свої власні відмінні цінності та підходи.

Дослідження показали, що ступінь, до якого навчальний заклад цінує викладання, може глибоко впливати на критичні результати, включаючи навчання та залучення студентів. Наприклад, заклади, які надають пріоритет викладанню та створюють сприятливе середовище для викладачів, часто демонструють вищий рівень мотивації та задоволеності викладачів. Опитування Collaborative for Academic Careers in Higher Education (COACHE) підкреслюють, що сприйняття викладачами свого інституційного середовища відіграє ключову роль у задоволеності роботою, особливо в установах, які надають перевагу викладанню, а не науковим дослідженням (Shaw et al., 2021).

Освітні розробники відіграють вирішальну роль у формуванні та підвищенні культури викладання у вищих навчальних закладах. Вони діють як каталізатори змін, сприяючи створенню середовища, яке заохочує інноваційні методи викладання та спільне навчання. Визначаючи ефективні практики викладання та створюючи сховища цих практик, освітні розробники допомагають сприяти спільному розумінню успішних підходів до викладання, які можуть бути прийняті на різних факультетах (Shaw et al., 2021; Elmi, 2020).

Незважаючи на потенціал для позитивних змін, існують виклики у формуванні сильної професійної культури у вищій освіті. Такі фактори, як інституційна політика, доступність ресурсів та колективні угоди, можуть створювати бар'єри для впровадження нових практик викладання. Більше того, напруженість між різноманітними ролями та вимогами, що висуваються до викладачів, може ускладнити розвиток цілісної професійної культури. Однак, завдяки постійній співпраці та відданості спільним цілям, навчальні заклади можуть подолати ці виклики та сприяти розвитку інклюзивної та ефективної культури викладання, яка підтримує всіх членів академічної спільноти.

## Виклики та бар'єри

Ландшафт закладів вищої освіти стає дедалі складнішим, а різноманітні виклики та бар'єри впливають на їхню здатність розвиватися та ефективно



впроваджувати сучасні практики. Ці виклики загострюються триваючою пандемією COVID-19, яка змусила заклади переоцінити свої операційні рамки та культурну динаміку (Rosowsky & Hallman, 2020). Цифровізація суспільства призводить до змін як у культурі ведення бізнесу, так і у професійній культурі (Makedon et al., 2022; Vorobiova et al., 2023).

Одним із важливих викликів є подолання культурних дилем у навчальних закладах. Оскільки коледжі та університети адаптуються до нових методологій навчання, вони стикаються з труднощами збереження традиційних культурних практик, водночас визнаючи потребу в інноваціях. Напруга між вшануванням історичної спадщини та адаптацією до сучасних цінностей може викликати опір серед зацікавлених сторін, і часто з'являються настрої на кшталт «ми завжди так робили».

Обмеженість ресурсів також відіграє важливу роль у викликах, з якими стикаються вищі навчальні заклади. Багато навчальних закладів борються з обмеженим фінансуванням, що перешкоджає їхній здатності впроваджувати нові практики або технології, які могли б покращити освітній досвід. Забезпечення зовнішнього фінансування має важливе значення для інтеграції нових концепцій, таких як соціальне та емоційне навчання, в існуючі програми; однак ці зусилля можуть наштовхнутися на бюрократичні перешкоди та інституційну інерцію (Kellot, 2024).

Вплив емоційного інтелекту на академічну успішність є ще однією сферою, де виникають проблеми. Дослідження вказують на помірно сильний зв'язок між ЕІ та академічною успішністю (Gilar-Corbi et al., 2018). Однак перехід до розвитку цих емоційних компетенцій не є простим, оскільки навчальним закладам може бракувати необхідних навчальних ресурсів і систем підтримки як для студентів, так і для викладачів. Інституційний контекст суттєво впливає на те, які зміни можуть бути впроваджені. Такі фактори, як колективні договори та укорінена інституційна політика, часто ускладнюють впровадження нових освітніх практик (Shaw, 2021). Наприклад, хоча розробники освітніх програм можуть виступати за активне навчальне середовище, відсутність фінансової підтримки може зробити такі ініціативи нездійсненними. Ця складність додає ще один рівень до загальної інституційної культури у вищій освіті, що робить необхідним пошук ефективних стратегій для подолання цих бар'єрів.

## **Висновки**

Майбутнє закладів вищої освіти, ймовірно, буде пов'язане з посиленням акценту на емоційному інтелекті та професійній культурі як важливих компонентах освітнього розвитку. Пристосовуючись до швидкозмінних суспільних потреб і технологічного прогресу, заклади повинні зосередитися на розвитку ЕІ як серед студентів, так і серед співробітників, щоб покращити комунікацію, співпрацю та загальну ефективність інституції. Цей зсув передбачає переоцінку поточних педагогічних підходів з метою кращої інтеграції ЕІ в навчальні плани та програми підготовки, тим самим готуючи випускників до складнощів сучасних робочих місць.



Включення структурованого тренінгу з емоційного інтелекту в академічні програми може значно покращити результати навчання студентів. Дослідження показують, що вищий ЕІ корелює з кращою академічною успішністю та міжособистісними стосунками, які мають вирішальне значення в різноманітних навчальних середовищах. Майбутні ініціативи можуть включати розробку комплексних навчальних модулів з ЕІ, спрямованих на покращення самосвідомості, соціальних навичок та управління взаємовідносинами серед студентів. Ці програми можуть бути адаптовані для задоволення потреб нетрадиційних учнів та учнів з різним походженням, забезпечуючи інклюзивну навчальну атмосферу, яка сприяє залученню та успіху.

Зі зростанням прагнення закладів ефективно передавати свої цінності та місію, чітке формулювання інституційної культури набуває дедалі більшої ваги. Інституції повинні зосередитися на створенні наративів, які відображають їхні історичні засади і водночас відповідають сучасним цінностям, особливо у світлі постійних суспільних змін. Підкреслення живої філософії інновацій, різноманітності та залучення громадськості буде більш ефективно резонувати з нинішніми та майбутніми студентами. Заклади можуть також досліджувати віртуальні платформи для спілкування, щоб підтримувати почуття спільноти та зв'язку серед розпорошених студентських груп, особливо зважаючи на те, що онлайн-навчання продовжує відігравати значну роль в освіті.

Освітні розробники повинні застосовувати спільний підхід, щоб ініціювати та підтримувати зміни у вищих навчальних закладах. Працюючи безпосередньо з викладачами, співробітниками та адміністрацією, вони можуть сприяти впровадженню успішних ініціатив, які ставлять на перше місце освітню та культурну обізнаність. Майбутні напрямки можуть включати налагодження партнерства між установами для обміну найкращими практиками, ресурсами та доказами успішних стратегій, тим самим підвищуючи довіру та ефективність пропонованих змін.

Зі зростанням різноманітності учнівського контингенту навчальним закладам потрібно буде визначити інклюзивність як пріоритет у своїй освітній практиці. Це передбачає створення доступних навчальних матеріалів та сприятливого навчального середовища, яке задовольняє різноманітні потреби всіх студентів. Забезпечення задоволення емоційних і соціальних потреб в академічних рамках може суттєво сприяти більш справедливому і цікавому освітньому досвіду, готуючи студентів до ефективної орієнтації в різноманітних робочих місцях і громадах.

## Посилання

Крупський, О. П., & Кіба, К. С. (2012). Взаємозв'язок між емоційною компетентністю та лідерством як складниками педагогічної діяльності. *Educational Dimension*, 36, 222-229. <https://doi.org/10.31812/educdim.v36i0.3416>

Крупський, О. П., & Стасюк, Ю. М. (2010). Формування інформаційної компетентності майбутнього менеджера-економіста в сучасному освітянському просторі. *Личность в едином образовательном пространстве: сборник научных статей I Международного образовательного форума*, 68-71. <https://philarchive.org/archive/KRU-20>

- Cunha, M. N., & Krupskyi, O. P. (2024). Inteligência social: desvendando a ciência das relações humanas. In *Culture and identity: Perspectives in the human sciences* (pp. 79–97). Editora Contemporânea. <http://surl.li/ccxxva>
- Elmi, C. (2020). Integrating social emotional learning strategies in higher education. *European journal of investigation in health, psychology and education*, 10(3), 848-858. <https://doi.org/10.3390/ejihpe10030061>
- Gilar-Corbi, R., Pozo-Rico, T., Pertegal-Felices, M. L., & Sanchez, B. (2019). Emotional intelligence training intervention among trainee teachers: a quasi-experimental study. *Psicologia: Reflexão e Crítica*, 31, 33. <https://doi.org/10.1186/s41155-018-0112-1>
- Kellot, T. (2024). *Empowering Students with Emotional Intelligence*. Science of mind. <https://scienceofmind.org/education-and-emotional-intelligence/>
- Khassawneh, O., Mohammad, T., Ben-Abdallah, R., & Alabidi, S. (2022). The relationship between emotional intelligence and educators' performance in higher education sector. *Behavioral Sciences*, 12(12), 511. <https://doi.org/10.3390/bs12120511>
- Landry, L. (2021). *Why Emotional Intelligence Is Important in Leadership*. Harvard Business School Online. <https://online.hbs.edu/blog/post/emotional-intelligence-in-leadership>
- Lee, I. H. (2024). *Emotional Intelligence in Higher Education: The Key to Successful Collaboration*. LinkedIn Corporation. <http://surl.li/umxjle>
- Lynch, M. (2016). *Examining the Impact of Culture on Academic Performance*. The Edvocate. <https://www.theedvocate.org/examining-the-impact-of-culture-on-academic-performance/>
- Makedon, V. V., Krasnikova, N., Krupskyi, O. P., & Stasiuk, Y. (2022). Arrangement of digital leadership strategy by corporate structures: a review. *Ikonomicheski Izsledvania*, 31(8), 19–40. <https://tinyurl.com/2-s2-0-85143514408>
- McDonald, A. T. (2021). *The Importance of Cultivating Emotional Intelligence in Schools*. National Association of Independent Schools. <https://www.nais.org/magazine/independent-teacher/spring-2021/the-importance-of-cultivating-emotional-intelligence-in-schools/>
- Rosowsky, D. V., & Hallman, K. (2020). *Communicating Culture in a Distributed World*. Inside Higher Ed. <http://surl.li/nextpp>
- Sánchez-Álvarez, N., Berrios Martos, M. P., & Extremera, N. (2020). A meta-analysis of the relationship between emotional intelligence and academic performance in secondary education: A multi-stream comparison. *Frontiers in psychology*, 11, 1517. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01517>
- Shaw, L., Grose, J., Kustra, E., Goff, L., Ellis, D., & Borin, P. (2021). Cultivating an institutional culture that values teaching: Developing a repository of effective practices. *To Improve the Academy: A Journal of Educational Development*, 40(1). <https://doi.org/10.3998/tia.962>
- Shengyao, Y., Xuefen, L., Jenatabadi, H. S., Samsudin, N., Chunchun, K., & Ishak, Z. (2024). Emotional intelligence impact on academic achievement and psychological well-being among university students: the mediating role of positive psychological characteristics. *BMC psychology*, 12(1), 389. <https://doi.org/10.1186/s40359-024-01886-4>
- Vivek, R., & Krupskyi, O. P. (2024). EI & AI in leadership and how it can affect future leaders. *European Journal of Management Issues*, 32(3), 174-182. <https://mi-dnu.dp.ua/index.php/MI/article/view/512>
- Vorobiova, V., Krupskyi, O., & Stasiuk, Y. (2023). The Role of Digital Technologies in Modern Trade: a Study of Global Trends and Prospects for Ukraine. *Economic Journal Odessa Polytechnic University*, 2(24), 44–55. <https://doi.org/10.15276/ej.o2.2023.5>

# Теоретичне обґрунтування системи факторів, що впливають на розвиток сільського господарства: український контекст

Роман Іванов , Юрій Гуртовий 

**Purpose.** The article aims to develop a system of factors that potentially affect agricultural production development in Ukraine, their theoretical substantiation, and classification by the nature of the impact. **Design / Method / Approach.** The presented list of factors is based on statistical indicators of the State Statistics Service of Ukraine and open data of international financial, economic, and agricultural organizations. General scientific methods of economic analysis and logical procedures founded on a systemic approach are widely used. **Findings.** According to the results of the research, the first and basic stage of the proposed methodical approach for identifying key factors that affect the development of agriculture has been implemented. Selected and theoretically substantiated 29 factors are classified according to six meaningful groups - natural and climatic, economic, socio and demographic, production and technological, ecological, and expendable. **Theoretical Implications.** Theoretical substantiation allows us to formulate hypotheses regarding the relationship between factors and the agriculture development level in Ukraine that can be confirmed or rejected based on the results of the following stages of the methodical approach. **Practical Implications.** The identification of key factors for farming development helps to focus on the most crucial elements, increasing the effectiveness of the state agricultural policy. In addition, their integration into the indicator system of economic security will contribute to the consideration of risks for agricultural activity when determining the state of the national economy. **Originality / Value.** Factors characterizing the challenges and threats associated with Russian aggression and affecting the functioning of Ukraine's agriculture in wartime conditions are proposed to be added to the initial set of variables. **Research Limitations / Future Research.** In further research, economic analysis of theoretically based variables should be carried out using multiple regression models and the principal components technique to determine the most significant factors. **Paper Type.** Theoretical Paper.

## Keywords:

agriculture, development, methodical approach, system of factors, integration, economic security indicators

## Contributor Details:

Roman Ivanov, Prof., Dr.Sc., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [romanivanov1926@gmail.com](mailto:romanivanov1926@gmail.com)

Yurii Hurtovyi, Ph.D student., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [hurtovyi\\_yu@365.dnu.edu.ua](mailto:hurtovyi_yu@365.dnu.edu.ua)



Економічна безпека України є однією із складових системи національної безпеки, що характеризує стан української економіки. Виходячи з того, що соціально-економічні системи макrorівня є відкритими та перебувають в тісній залежності від факторів зовнішнього впливу, а економічне середовище є мінливим, вирізняючись значним рівнем волатильності ринкової кон'юнктури, турбулентності та невизначеності, моніторинг та ідентифікація ключових викликів та загроз економічній безпеці країни вимагають дотримання принципу безперервності.

Оскільки сільськогосподарське виробництво має стратегічне значення для національної економіки, роблячи значний внесок до кінцевої вартості товарів і послуг, процеси, пов'язані із його розвитком, мають вплив на економічну безпеку України, визначаючи стан її компонентів (Ivanov & Hurtovyi, 2023). Таким чином, ризики і загрози сільськогосподарській діяльності можуть стати проблемою для забезпечення економічної безпеки країни.

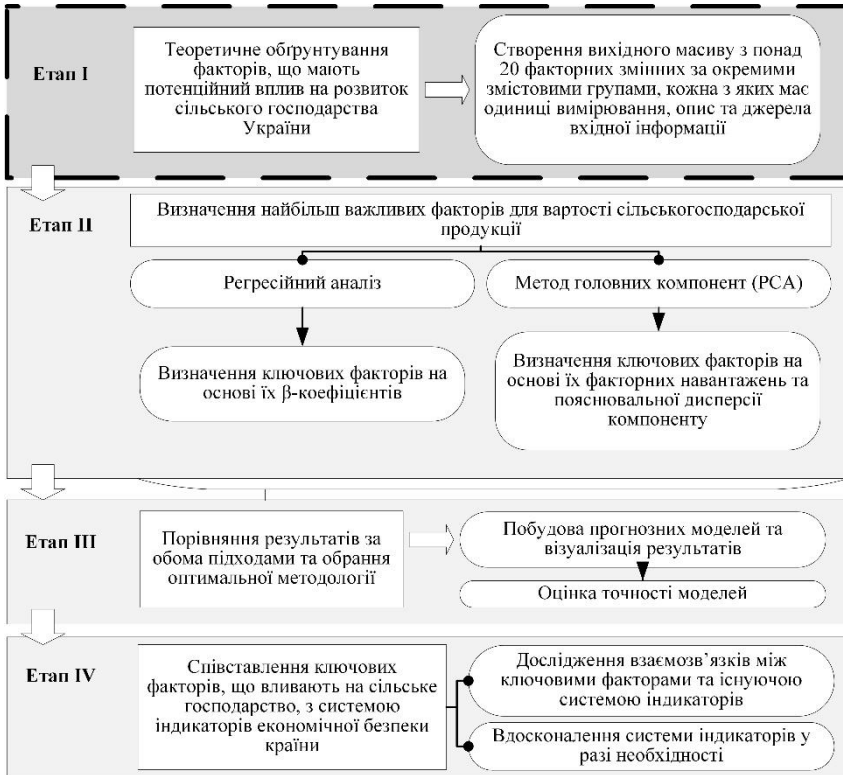
Корутко and Корутко (2023) підкреслюють, що залежність від природних факторів та невисока рентабельність є особливістю функціонування аграрного сектору, що може бути потенційною загрозою сільськогосподарській діяльності та перешкодою для досягнення оптимального рівня продовольчої безпеки. За даними Sokolenko (2023), повномасштабне вторгнення не тільки посилило існуючі проблеми, проте і спричинило появу нових викликів для агропромислового сектору, серед яких: пандемія COVID-19, наслідки збройної агресії, економічні (коливання цін, проблеми зі збутом, експортом, додатковими інвестиціями), екологічні (зміна клімату), соціальні фактори (проблеми з кадровим забезпеченням). Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine (2024) серед факторів, що мають ключовий вплив на сільське господарство України у 2023–2024 рр., виділяє можливість експорту морським транспортом, врожайність залежно від природно-кліматичних умов, офіційний курс гривні щодо іноземних валют, наявність доступних кредитів, що є одним із інструментів бюджетної підтримки. National Institute for Strategic Studies (2024) також вважає обмеженість фінансових ресурсів сільськогосподарських виробників викликом для аграрного сектору України, однак, доповнює перелік потенційних загроз дефіцитом трудових ресурсів, руйнуванням інфраструктури (зернохосвищ, продовольчих складів) та втратою земельних ресурсів внаслідок бойових дій, мінування та руйнування Каховської ГЕС.

Таким чином, розвиток сільського господарства як однієї із ключових галузей економіки України перебуває під впливом безлічі факторів, теоретичне обґрунтування, ідентифікація, класифікація та визначення впливу яких є актуальним у контексті інтеграції найважливіших з них до системи індикаторів економічної безпеки країни з метою її зміцнення у поточних умовах.

## **Мета і завдання**

Метою дослідження є побудова системи факторів, що мають потенційний вплив на розвиток сільськогосподарського виробництва, їх теоретичне

обґрунтування і класифікація за характером впливу. Цей етап є найпершим і базовим для проведення подальших емпіричних досліджень згідно з розробленим методичним підходом (рисунок 1), у результаті використання якого будуть ідентифіковані ключові фактори, що впливають на сільськогосподарську діяльність та виробництво.



**Рисунок 1 – Методичний підхід до ідентифікації ключових факторів, які впливають на розвиток сільського господарства і можуть бути інтегровані до системи індикаторів економічної безпеки країни (Джерело: Створено авторами)**

Без забезпечення всебічності і актуальності вихідного масиву факторних змінних, розробленого на цьому етапі, результати економіко-статистичного та економіко-математичного аналізу (етап II-III) будуть некоректними або неповними. Це у свою чергу призводить до неправильної інтерпретації впливу факторів та інтеграції їх до системи індикаторів економічної безпеки (етап IV). Теоретичне обґрунтування дозволяє сформулювати гіпотези щодо зв'язку між факторами та результуючою змінною, значущість і вагомість якого перевіряється за допомогою регресійного або факторного аналізу з використанням методу головних компонент.

Виходячи з вищенаведеного, основними завданнями дослідження є огляд наукової економічної літератури, звітів профільних міністерств, економічних, соціальних і екологічних показників, на основі чого має бути представлений перелік факторних змінних, класифікованих за характером впливу, що мають опис, одиниці вимірювання та джерела вхідної інформації.

Отже, теоретично обґрунтовані фактори є основою для розробки рекомендацій щодо планування довгострокового розвитку агросектора, ідентифікації загроз економічній безпеці, пов'язаних із сільським господарством, прийняття стратегічних рішень у сфері державної аграрної політики.

## **Матеріали та методи**

Дослідження спирається на аналіз економічної літератури українських та світових науковців, звіти Міністерства аграрної політики та продовольства України, Міністерства розвитку громад та територій України, статистичні показники Державної служби статистики України, Світового банку, Організації економічного співробітництва та розвитку (OECD), Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO).

У процесі здійснення теоретичного обґрунтування системи факторів широко використовуються загальнонаукові методи економічного аналізу (аналіз окремих факторів та їх синтез за узагальненими за характером впливу) та економіко-логічні методи (порівняння факторів, розробка методики ідентифікації ключових факторів) з використанням системного підходу.

## **Результати та обговорення**

Виходячи з існуючих наукових досліджень, присвячених вивченню впливу різних факторів на сільськогосподарське виробництво в Україні, та доступності статистичних даних, потенційні змінні можливо класифікувати за наступними змістовими групами: природно-кліматичні, економічні, соціально-демографічні, виробничо-технологічні та екологічні.

Несприятливі природно-кліматичні умови, які характеризуються екстремальним підвищенням температур, що призводить до посухи та зменшення вологості орних земель (таблиця 1), можуть значно знижувати врожайність сільськогосподарських культур, неадапованих до таких погодних умов, що у свою чергу приводить до скорочення обсягів виробництва. Запропоновані фактори в межах даної змістової групи не суперечать результатам досліджень, в яких підкреслюється сильна залежність сільськогосподарського виробництва від мінливості погоди та екстремальних кліматичних явищ, зокрема спеки, повені та посухи (Deryng et al., 2014; Powell & Reinhard, 2015).

Економічні умови, на нашу думку, є однією з вирішальних груп факторів, що забезпечують розвиток сільського господарства (таблиця 2). Pechuk (2019) вважає, що для збільшення виробництва сільськогосподарської продукції в галузі як рослинництва, так і тваринництва, а також підвищення конкурентоспроможності необхідна державна підтримка українських аграріїв.

**Таблиця 1 – Факторні змінні, що характеризують природно-кліматичні умови та мають потенційний вплив на розвиток сільськогосподарського виробництва (Джерело: Створено авторами)**

Змінна	Фактор	Одиниця вимірювання	Джерело
$x_1$	Зміна температури на суші	°C	FAO (2023)
$x_2$	Вплив посухи, аномалія вологості ґрунту орних земель	% зміна	OECD (2023)
$x_3$	Вплив екстремальних температур	% населення, що потерпає від спеки (> 35°C)	OECD (2023)

Oliiunyk et al. (2020) виступають за її посилення шляхом надання податкових і митних преференцій для подальшого розвитку галузі. Разом з тим Petliuk and Miedvedkova (2021) наголошують, що існуюча система державної фінансової підтримки має бути вдосконалена, оскільки одними із наслідків субсидіювання сільськогосподарських виробників є спотворення зовнішньої торгівлі, ринків факторів виробництва та конкурентної поведінки. Незважаючи на те, що ефективність державної підтримки агросектору залежить від конкретних заходів державної аграрної політики, однак, використання доцільних інструментів бюджетної підтримки дає змогу фермерським господарствам здійснювати інвестиції, забезпечуючи модернізацію обладнання та інфраструктури, зменшувати вартість виробничих ресурсів (паливно-енергетичні, мінеральні чи органічні добрива), знижуючи витрати на виробництво і собівартість продукції, що призводить до підвищення її конкурентоспроможності.

Подібний потенційний вплив на сільськогосподарське виробництво мають зростання капітальних і прямих іноземних інвестицій, вартість основних засобів, введені в дію в сільському господарстві, адже результатом є підвищення обсягів виробництва, його рентабельності. На думку Zelisko (2021), при раціональному використанні іноземних інвестицій темпи сільськогосподарського виробництва значно прискорюються. Продуктивність праці ж у сільськогосподарському виробництві також є свідченням ефективності виробництва: зростання продуктивності праці означає збільшення обсягів виробленої продукції за однакових витрат трудових ресурсів, що на думку Ivakhnenko (2018), сприяє підвищенню конкурентоспроможності аграрного сектору економіки.

Оскільки для України рівень забезпеченості потреб населення у пшениці перевищує оптимальний майже у 4.33 разів, а зернові культури є домінуючим товаром серед продуктів рослинного походження у структурі експорту (Ivanov & Hurtovyi, 2023), обсяг її внутрішньої пропозиції має вплив як на формування ринкової ціни, так і на стимули фермерів перейти до вирощування інших сільськогосподарських культур, спровокувавши структурні зрушення у сільськогосподарському виробництві.

Зважаючи на те, що обсяги експортованої української органічної сільськогосподарської продукції у 2022 році автомобільним транспортом зросли на 65.85% порівняно з 2021 роком внаслідок обмеженого функціонування морських перевезень (Ivanov et al., 2024), частка вантажних перевезень є



важливим логістичним фактором функціонування агросектору в умовах високих ризиків російської агресії в Чорному морі. Із цим фактором тісно пов'язана вартість експорту сільськогосподарської продукції, яка стимулює виробників збільшувати обсяги виробництва для задоволення зовнішнього попиту та підтримки глобальної продовольчої безпеки. За даними Yageta and Khrystenko (2024), навіть під час активних бойових дій майже третина сільськогосподарської продукції експортується, забезпечуючи більш ніж 50% валютних надходжень, що підкреслює важливість цього фактору для розвитку галузі.

**Таблиця 2 – Факторні змінні, що характеризують економічні умови та мають потенційний вплив на розвиток сільськогосподарського виробництва (Джерело: Створено авторами)**

Змінна	Фактор	Одиниця вимірювання	Джерело
$x_4$	Обсяг загальної бюджетної підтримки (TBSE)	млн грн	OECD (2023)
$x_5$	Обсяг внутрішньої пропозиції пшениці та продуктів	1000 тонн	FAO (2023)
$x_6$	Загальні надходження прямих іноземних інвестицій	млн дол.	FAO (2023)
$x_7$	Частка вантажних перевезень	%	OECD (2023)
$x_8$	Капітальні інвестиції у сільське господарство	млн грн	State Statistics Service (2024)
$x_9$	Вартість експорту сільськогосподарської та продовольчої продукції	тис. дол. США	State Statistics Service (2024)
$x_{10}$	Вартість основних засобів, введених в дію в сільському господарстві	млн грн	State Statistics Service (2024)
$x_{11}$	Продуктивність праці на 1 зайнятого у сільськогосподарському виробництві	тис. грн	State Statistics Service (2024)

Потенційний вплив соціально-демографічних умов проявляється у мінімальності обсягів виробництва залежно від попиту на сільськогосподарську продукцію та наявності ефективної та результативної робочої сили (таблиця 3). Очевидним є те, що сільськогосподарські товаровиробники будуть нарощувати виробництво продуктів харчування у випадку постійно зростаючого внутрішнього споживання, одним із основних драйверів якого є збільшення щорічної чисельності населення.

Не менш важливим фактором в Україні є сільське населення, яке, з одного боку, формує контингент працездатного населення і може бути залученим до сільськогосподарського виробництва на місцевих підприємствах, а з іншого – може спровокувати перенасичення ринку за рахунок організації аграрного виробництва в особистих селянських господарствах. Demchenko (2022) підкреслює, що саме у сільському господарстві зайнято більше половини сільського населення. З цим фактором тісно взаємопов'язані рівень зайнятості у сільському господарстві та кількість найманих працівників,



збільшення якої має сприяти зростанню обсягів виробництва продукції за рахунок більшої кількості оброблюваних земель сільськогосподарського призначення, однак, за умови оптимального управління людськими ресурсами без погіршення продуктивності праці.

**Таблиця 3 – Факторні змінні, що характеризують соціально-демографічні умови та мають потенційний вплив на розвиток сільськогосподарського виробництва (Джерело: Створено авторами)**

Змінна	Фактор	Одиниця вимірювання	Джерело
$x_{12}$	Щорічна чисельність населення	млн осіб	World Bank (2024a)
$x_{13}$	Сільське населення	% від загальної кількості	World Bank (2024a)
$x_{14}$	Зайнятість у сільському господарстві	% від загального числа зайнятих	World Bank (2024a)
$x_{15}$	Кількість найманих працівників	тис. осіб	State Statistics Service (2024)

До наступної групи віднесені фактори, що характеризують рівень технологій та технічних засобів виробництва – високого рівня енергоспоживання на фермі за рахунок електрифікації та механізації сільськогосподарських процесів, достатньою забезпеченістю технікою для виконання сільськогосподарських робіт (таблиця 4). Чим більшим є їх рівень, тим потенційно більшими є масштаби виробничої діяльності у галузі сільського господарства. Boltianska and Boltianski (2020) підкреслюють, що сільське господарство належить до велико-енергоємних споживачів, а Lysenko (2018) наголошує на неухильному зростанні залежності сільськогосподарського сектору, особливо великих тваринницьких комплексів та птахоферм, від електроспоживання внаслідок підвищення рівня індустріалізації виробництва.

Не менш важливою характеристикою є урожайність зернових і зернобобових культур як провідних культур у землеробстві. Низько досліджень урожайність визначається як фактор сільськогосподарського виробництва, який є критерієм оцінки ефективності використання сільськогосподарських угідь (Oliinyk et al., 2020; Sakhno & Zarembo, 2024). Її підвищення часто досягається за рахунок більшого використання пестицидів для боротьби зі шкідливими або небажаними мікроорганізмами, рослинами та тваринами, позитивно впливаючи на зростання сільськогосподарського виробництва. Vasylenko (2018) вважає, що цей фактор має високу економічну ефективність і позитивно впливає на культуру землеробства, розв'язуючи проблему продовольчої безпеки України. З іншого боку, Lishchuk et al. (2023) наголошують, що при оцінці важливості пестицидів для сільськогосподарського виробництва має враховуватись навантаження на агроєкосистеми, пов'язане з накопиченням токсичних хімічних речовин у ґрунті, забруднення ними сільськогосподарської продукції, водних ресурсів.

**Таблиця 4 – Факторні змінні, що характеризують рівень технологій і наявність технічних засобів виробництва та мають потенційний вплив на розвиток сільськогосподарського виробництва (Джерело: Створено авторами)**

Змінна	Фактор	Одиниця вимірювання	Джерело
$x_{16}$	Пряме енергоспоживання на фермі	тонн нафтового еквіваленту	OECD (2023)
$x_{17}$	Загальний обсяг продажу пестицидів у сільському господарстві	тонн	OECD (2023)
$x_{18}$	Наявність сільськогосподарської техніки (трактори, комбайни) у господарствах населення	тис. штук	State Statistics Service (2024)
$x_{19}$	Урожайність культур зернових та зернобобових	ц/Га	State Statistics Service (2024)

Сільськогосподарська діяльність тісно пов'язана із змінами навколишнього середовища, оскільки за даними World Bank (2024b) глобальна агропродовольча система є джерелом третини всіх викидів, що загрожують як продовольчій безпеці, так і екологічній стійкості. Виходячи з цього, викиди парникових газів можуть мати взаємозв'язок із розвитком сільського господарства (таблиця 5), якщо темпи досягнення кліматичної нейтральності є повільними. Svyunous et al. (2024) вважають, що вплив наслідків викидів парникових газів у довгостроковій перспективі буде посилюватись, негативно впливаючи на розвиток сільського господарства.

**Таблиця 5 – Факторні змінні, що характеризують екологічні умови та мають потенційний вплив на розвиток сільськогосподарського виробництва (Джерело: Створено авторами)**

Змінна	Фактор	Одиниця вимірювання	Джерело
$x_{20}$	Сільськогосподарські викиди парникових газів	тис. тонн CO <sub>2</sub> -еквівалента	OECD (2023)
$x_{21}$	Викиди сільськогосподарського аміаку (NH <sub>3</sub> )	тонн	OECD (2023)

На нашу думку, незважаючи на те, що викиди є скоріше результатом сільськогосподарської діяльності, їх виділення в окрему змістову групу факторних змінних здійснено з метою перевірки гіпотези про вплив заходів екологічної політики стосовно обмеження викидів парникових газів та аміаку на сільськогосподарське виробництво. Хоча надмірне використання аміаку й призводить до виснаження ґрунтів, у сільському господарстві він використовується для підвищення врожайності, оскільки азот у його складі є одним із елементів, необхідного рослинам для розвитку, що і зумовлює входження показника викидів сільськогосподарського аміаку до переліку факторних змінних, що характеризують екологічні умови.

Витрати на виробництво продукції сільського господарства є не менш важливою групою, яка має вплив на сільськогосподарську діяльність і виробництво, оскільки безпосередньо визначають рівень рентабельності сільськогосподарського виробництва згідно з загальновідомими методиками розрахунку. Важливість витрат для сільськогосподарського виробництва корелює із дослідженням Movchaniuk (2021), яка вважає, що вони виступають одним із найбільш використовуваних показників, що характеризують умови та ефективність виробництва продукції сільського господарства.

Зростання витрат за різними з запропонованих напрямків (таблиця 6) загалом призводять до зростання собівартості сільськогосподарської продукції, а отже, і її ціни для споживача. Згідно із мікроекономічною теорією, за більшої ціни частина споживачів відмовляється від придбання продукції, попит знижується, що призводить до утворення надлишку продукції, у відповідь на який сільськогосподарські виробники реагують скороченням обсягів виробництва для збалансування попиту і пропозиції. Виходячи з цього, зростання витрат призводить до скорочення обсягів сільськогосподарського виробництва. У таблиці 6 у вигляді факторів представлені не тільки прямі матеріальні витрати у сукупності, проте і окремі їх складові – наприклад, витрати на посадковий матеріал чи паливо-мастильні матеріали, які можуть більш суттєвіше впливати на залежну змінну.

**Таблиця 6 – Факторні змінні, що характеризують витрати підприємств на виробництво продукції сільського господарства та мають потенційний вплив на його розвиток (Джерело: Створено авторами)**

Змінна	Фактор	Одиниця вимірювання	Джерело
$x_{22}$	Вартість прямих матеріальних витрат	млн грн	State Statistics Service (2024)
$x_{23}$	Вартість витрат на використання та посадковий матеріал		
$x_{24}$	Вартість витрат на корми		
$x_{25}$	Вартість витрат на мінеральні добрива		
$x_{26}$	Вартість витрат на пальні і мастильні матеріали		
$x_{27}$	Вартість витрат на оплату праці		
$x_{28}$	Вартість витрат на орендну плату за земельні паї		
$x_{29}$	Вартість витрат на амортизацію		

Така деталізація структури витрат спирається на звіт Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine (2024), в якому серед факторів впливу визначені зростання витрат на паливо, насіння, добрива, засоби захисту рослин, запасні частини. Перевірка цієї гіпотези – її прийняття або відхилення – має бути здійснена за результатами реалізації наступного етапу запропонованого методичного підходу, представленого на рисунку 1.

Триваюче російське вторгнення та цілеспрямовані атаки щоденно спричиняють значні пошкодження сільськогосподарських об'єктів, складської

інфраструктури та сільськогосподарських терміналів, призводять до погіршення якості сільськогосподарських угідь внаслідок хімічного пошкодження ґрунтів і мінного-вибухового забруднення, порушення логістичної системи розподілу продукції, надзвичайно ускладнюючи функціонування українського аграрного сектору.

Оскільки за даними Kyiv School of Economics (2024) станом на 31 грудня 2023 року аграрний сектор зазнав збитків та втрат на суму понад 80 млрд дол. США (вартість знищених активів оцінюється на рівні 10.3 млрд дол., недооцінений дохід сільськогосподарських виробників становить близько 69.8 млрд дол. США), до системи факторів, що мають потенційний вплив на розвиток сільськогосподарського виробництва слід додати змінні, які характеризують виклики та загрози пов'язані з російською агресією (таблиця 7). Розроблена система змінних корелює з твердженням Matviishyn and Navriushyna (2023), згідно з яким на подальший розвиток сільського господарства матиме вплив зменшення площ сільськогосподарських угідь через їх тимчасову окупацію або непридатність до обробітку внаслідок мінно-вибухового забруднення. Окрім цього, Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine (2024) визначає можливість експорту сільськогосподарської продукції за допомогою морських перевезень як ключовий фактор впливу на розвиток сільськогосподарського виробництва України у 2023-2024 рр.

**Таблиця 7 – Факторні змінні, що характеризують виклики та загрози, що пов'язані з російською агресією та мають потенційний вплив на розвиток сільськогосподарського виробництва (Джерело: Створено авторами)**

Змінна	Фактор	Одиниця вимірювання	Джерело
$x_{30}$	Площа замінованих або тимчасово окупованих земель сільськогосподарського призначення	тис. км <sup>2</sup>	DeepState UA (2024)
$x_{31}$	Вартість знищеної або пошкодженої сільськогосподарської інфраструктури (складські приміщення, зерносховища, об'єкти внутрішньо-водного та морського транспорту)	млн грн	Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine (2024) Kyiv School of Economics (2024)
$x_{32}$	Обсяги експорту через морські порти України	%	State Statistics Service (2024) Ukrainian Grain Association (2024) Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine (2024)

Безумовно, визначений перелік класифікованих факторних змінних, що мають потенційний вплив на розвиток сільського господарства, є об'єктом подальшої актуалізації, адже вимагає постійного доповнення залежно від появи нових викликів, загроз і можливостей внаслідок трансформації

економічного середовища, технологічного прогресу, змін умов міжнародної торгівлі сільськогосподарською продукцією, посилення впливу екстремальних погодних явищ чи екологічних вимог.

## Висновки

Теоретичне обґрунтування системи факторів, що мають потенційний вплив на сільськогосподарське виробництво України, є базовим етапом для подальшої ідентифікації ключових чинників за допомогою регресійного аналізу або методу головних компонент. Забезпечення всебічності і актуальності вихідного масиву факторних змінних дозволить врахувати найбільш вагомі ризики та загрози сільськогосподарській діяльності при вдосконаленні системи індикаторів економічної безпеки країни.

Згідно з результатами, на сільськогосподарське виробництво мають потенційний вплив близько 30 факторів, що класифіковані за різними групами, а саме: природно-кліматичні, економічні, соціально-демографічні, виробничо-технологічні, екологічні та витратні. Також теоретично обґрунтовано вплив чинників, пов'язаних з російською агресією, яка спровокувала появу нових загроз та викликів для стійкого функціонування сільського господарства України. У подальших дослідженнях слід здійснити економіко-статистичний та економіко-математичний аналіз з використанням моделей множинної регресії та методу головних компонент з метою визначення найбільш суттєвих факторів, що можуть бути інтегровані до системи індикаторів економічної безпеки країни.

## Посилання

- Boltianska, N. & Boltjanski, O. (2020). Vyznachennia napriamiv enerhozberezhennia v silskomu hospodarstvi [Defining directions of energy saving in agriculture]. *Scientific bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 10(1). <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/10724> [in Ukrainian]
- DeepState UA. (2024). *Map of the war in Ukraine*. DeepStateMap. <https://deepstatemap.live/>
- Demchenko, A. (2022). Development of agriculture and its role in the formation of employment of the rural areas in the Odessa region. *Innovation and Sustainability*, 2, 205–216. <https://doi.org/10.31649/ins.2022.2.205.216> [in Ukrainian]
- Deryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., & Warren, R. (2014). Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. *Environmental Research Letters*, 9(3), 034011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034011>
- FAO. (2023). *Statistical Database of the United Nation Food and Agriculture Organization [Data set]*. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Ilchuk, O. (2019). State support of agriculture in Ukraine. *Ekonomika APK*, 2, 93–98. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.201902093> [in Ukrainian]
- Ivakhnenko, O. (2018). Produktivnist pratsi v ahrahamomu sektori ekonomiky [Labor productivity in the agricultural sector of the economy]. *Bulletin of Sumy State University. Economy*, (4), 43-51. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76993> [in Ukrainian]
- Ivanov, R. V., & Hurtovyj, Y. V. (2023). Agricultural Development Management in the Context of Ukraine's Foreign Economic Security. *European Journal of Management Issues*,

- 31(3), 160-176. <https://doi.org/10.15421/192314>
- Ivanov, R., Hurtovyi, Y., & Ivanov, K. (2024). Problems of the Organic Agricultural Production Development as Threats to Ukraine's Economic Security. *European Journal of Management Issues*, 32(2), 115-130. <https://doi.org/10.15421/192410>
- Kopytko, V., & Kopytko, O. (2023). Pidvyshchennia efektyvnosti derzhavnogo rehuliuвання ahrarnoho sektora APK u voiennyi ta pislivoiennyi period [Increasing the efficiency of state regulation of the agricultural sector in the war and post-war period]. *Economy and Society*, (52). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-52-35>
- Kyiv School of Economics. (2024). *Zbytky, vtraty ta potreby silskoho hospodarstva cherez povnomasshtabne vtorhennia [Damages, losses and needs of agriculture due to full-scale invasion]*. Center for Food and Land Use Research (KSE Agrocenter). [https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/02/RDNA3\\_ukr.pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/02/RDNA3_ukr.pdf) [in Ukrainian]
- Lishchuk, A., Parfenyk, A., Karachinska, N., & Ternoviy, Yu. (2023). Environmental risks due to the impact of pesticide load in agrocenoses of cereal crop predecessors. *Balanced Nature Using*, 4, 115-127. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2023.292726> [in Ukrainian]
- Lysenko, O. (2018). Analysis of use renewable energy sources for increasing the quality of electrical supply in agricultural production. *Scientific Bulletin of the Tavria Agrotechnological State University*, 8(2). <http://doi.org/10.31388/2220-8674-2018-2-29> [in Ukrainian]
- Matviushyn, Ye. H., & Havriushyna, M. Ye. (2023). Prohnozuvannya vplyvu rosiiskoi viiskovoi ahresii na obsiah y vyrobnytstva ta eksportu ukrainskoi ahrarnoi produktsii [Forecasting the impact of Russian military aggression on the volumes of production and export of Ukrainian agricultural products]. *Efficiency of Public Administration*, 73, 51–55. <https://doi.org/10.36930/507308> [in Ukrainian]
- Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (2024). *Rik roboty Ukrainskoho korydoru: eksportovano ponad 64 mln tonn produktsii [The year of operation of the Ukrainian Corridor: more than 64 million tons of products were exported]*. <https://mtu.gov.ua/news/35854.html> [in Ukrainian]
- Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine. (2024). *Ukraina: vplyv viiny na prybutkovist silskohospodarskoho vyrobnytstva [Ukraine: the impact of the war on the profitability of agricultural production]*. <https://minagro.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/viini-na-prybutkovist-silskogospodarskogo-virobnitstvavipusk-4.pdf> [in Ukrainian]
- Movchaniuk, A. (2021). Ekonomichna sutnist vyrobnych ykh vytrat ta yikh rol u systemi upravlinnia diialnistiu silskohospodarskykh pidpriemstv [Economic essence of production costs and their role in the system of management of agricultural enterprises]. *Economy and Society*, 31. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-31-5> [in Ukrainian]
- National Institute for Strategic Studies. (2024, February 14). *Ahrarnyi sektor Ukrainy u 2023 rotsi: skladovi stiikosti, problemy ta perspektyvni zavdannia [The agricultural sector of Ukraine in 2023: components of sustainability, problems and promising tasks]*. <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/ahraryy-sektor-ukrayiny-u-2023-rotsi-skladovi-stiykosti-problemy-ta> [in Ukrainian]
- OECD. (2024). *OECD Agriculture statistics [Data set]*. OECD iLibrary. <http://dx.doi.org/10.1787/agr-pcse-data-en>
- Oliinyk, N., Shashkova, N., & Makarenko, S. (2020). Business analysis of the current agricultural situation in the Kherson region. *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series Economic Sciences*, 39, 32-39. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2020-39-6> [in Ukrainian]
- Petliuk, L., & Miedviedkova, N. C. (2021). State support in ensuring the development of the agricultural sector of the Ukrainian economy. *Ekonomika Ta Derzhava*, 2, 105-111. <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2021.2.105> [in Ukrainian]
- Powell, J.P., Reinhard, S., 2015. Powell, J. P., & Reinhard, S. (2016). Measuring the effects of extreme weather events on yields. *Weather and Climate Extremes*, 12, 69-79.

- <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.02.003>
- Sakhno, A., & Zaremba, O. (2024). Efektyvnist vykorystannia zemelnykh uhid u konteksti vyrobnytstva silskohospodarskykh kultur [Efficiency of land use in the context of agricultural crop production]. *Agrosvit*, 4, 37-47. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2024.4.37> [in Ukrainian]
- Sokolenko, V. (2023, October 17). *Ekolohichni, sotsialno-demografichni ta ekonomichni vyklyky serednoho ta velykoho biznesu v ahropromyslovomu sektori [Environmental, socio-demographic and economic challenges of medium and large businesses in the agro-industrial sector]*. AgroPortal. <https://agroportal.ua/blogs/ekologichni-socialno-demografichni-ta-ekonomichni-vikliki-serednogo-ta-velikogo-biznesu-v-ahropromislovomu-sektori> [in Ukrainian]
- State Statistics Service. (2024). *Economic statistics [Data set]*. <https://www.ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian]
- Svynous, I., Nikitchenko, O., Prysiazhniuk, N., Ivanko, V., & Kostyuk, O. (2024). Upravlinnia klimatychnymi ryzykamy na osnovi dyversyfikatsii v silskomu gospodarstvi v povoiennyi period vidrozhennia ekonomiky Ukrainy [Management of climate risks based on diversification in agriculture in the post-war period of economic revival of Ukraine]. *Efektivna ekonomika*, 6. <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.6.11> [in Ukrainian]
- Ukrainian Grain Association. (2024). *Results of the «Grain Corridor» work*. <https://uga.ua/statistika-zemovogo-koridoru/>
- Vasylenko, L. (2018). Efficiency of application of crop protection chemicals in agriculture. *Modern Economics*, 11(1), 38-42. [https://doi.org/10.31521/modecon.V11\(2018\)-06](https://doi.org/10.31521/modecon.V11(2018)-06) [in Ukrainian]
- World Bank. (2024a). *World Development Indicators [Data set]*. DataBank. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators/preview/on>
- World Bank. (2024b). *Climate-Smart Agriculture*. <https://www.worldbank.org/en/topic/climate-smart-agriculture>
- Yarema, L., & Khrystenko, H. (2024). Realii, vyklyky ta mozhlyvosti silskoho gospodarstva pid chas viiny [Realities, challenges and opportunities of agriculture during the war]. *Efektivna ekonomika*, 3. <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.3.53> [in Ukrainian]
- Zelisko N. (2021). Current state of foreign investment in Ukrainian agriculture. *Agrarian economy*, 14(1), 109-115. <https://doi.org/10.31734/agrarecon2021.03-04.109>

# Побудова ефективної системи інформаційно-аналітичного забезпечення управління підприємством: задачі та виклики

Станіслав Свір 

**Purpose.** The purpose of this study is to identify key challenges and areas for improvement in establishing an effective information and analytical support (IAS) system for enterprise decision-making. The research examines critical issues necessary for optimizing information flows and explores how current challenges impact IAS functionality in today's dynamic business environment. **Design / Method / Approach.** A decomposition approach is applied to break down the IAS process into specific challenges, focusing on subject-oriented and organizational aspects. Systems analysis is used to assess interdependencies within IAS and map out interactions between departments involved in data handling. **Findings.** The study identifies essential IAS effectiveness criteria, such as relevance, timeliness, and comparability of information, along with the ability to analyze data in detail. It also highlights modern challenges like large data volume management, adapting to rapid market changes, and maintaining data security. The success of IAS implementation is shown to depend on interdepartmental cooperation and clear alignment of responsibilities. **Theoretical Implications.** This work enhances theoretical understanding by modeling the IAS process as a structured component of enterprise management, where interdepartmental processes are essential for success. **Practical Implications.** Insights from this study support managers in structuring IAS processes that are more responsive, data-driven, and resilient. It also serves as a guide for companies transitioning from outdated systems to more flexible platforms. **Originality / Value.** This study provides a comprehensive approach to IAS challenges by integrating theoretical models with real-world constraints, offering a framework for incorporating big data, AI, and machine learning into IAS for effective decision-making. **Research Limitations / Future Research.** Further and more in-depth analysis is required for substantive and organizational-methodological issues of responding to the challenges identified in the research. **Paper Type.** Applied Research.

## Keywords:

information-analytical support, decision-making support, enterprise information system

## Contributor Details:

Stanislav Svir, Postgraduate student, Oles Honchar Dnipro National University:  
Dnipro, UA, [svir\\_s@365.dnu.edu.ua](mailto:svir_s@365.dnu.edu.ua)





В сучасному світі існує багато теорій та методик управління бізнес-процесами, прийняття управлінських рішень, управління проектами на підприємствах (Grynko & Hviniaashvili, 2024). Вони мають суттєві відмінності та різні сфери застосування, але їх об'єднує одна спільна риса – для їх функціонування необхідна вхідна інформація, у більшості своєму у вигляді певних розрахункових показників. Підготовка такої інформації є задачею окремого процесу інформаційно-аналітичного забезпечення.

На практиці відсутність відповідного інформаційно-аналітичного забезпечення не дає повною мірою розкрити потенціал методик управління підприємством, стримує їх запровадження, робить неможливим прийняття обґрунтованих рішень, ускладнює делегування повноважень. А оскільки зміни зовнішніх умов в будь-якому випадку вимагають прийняття певних управлінських рішень, то без відповідного інформаційно-аналітичного забезпечення, такі рішення приймаються на підставі нерелевантної інформації або інтуїтивно, що перетворює управління підприємством на непрозорий, суб'єктивний, подекуди інтуїтивний та відповідно ризикований процес (Новікова et al., 2020; Отенко, 2014). Такий процес прийняття управлінських рішень втрачає довіру з боку зацікавлених сторін, таких як акціонери, кредитори та партнери. Ефективне використання інформаційно-аналітичного забезпечення сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємств у цифровій економіці, що особливо важливо для розвитку економіки України (Гринько & Петриняк, 2024).

Побудова системи інформаційно-аналітичного забезпечення є складним організаційним процесом, який лежить на перетині компетенцій та сфер відповідальності багатьох підрозділів та спеціалістів підприємства. У зв'язку з цим, часто основні проблеми побудови цього процесу лежать не у предметній області окремих компетенцій, а саме у галузі організації взаємодії між підрозділами та розподілу повноважень та відповідальності.

Зростаючі обсяги даних, необхідність інтеграції різноманітних систем та платформ, а також виклики у сфері кібербезпеки вимагають від підприємств нових підходів до управління інформацією. Крім того, використання застарілих систем обліку, таких як продукти 1С, створює додаткові ризики, що актуалізує потребу в переході на більш гнучкі та безпечні платформи. На цьому фоні важливо розробити ефективну систему інформаційно-аналітичного забезпечення, яка здатна оперативно реагувати на зовнішні виклики та підтримувати обґрунтованість управлінських рішень.

## **Мета та завдання дослідження**

Метою даного дослідження є визначення основних завдань, які необхідно вирішити для забезпечення ефективності процесу інформаційно-аналітичного забезпечення, а також виявлення головних викликів, що постають під час вирішення цих завдань у сучасних умовах. Дослідження спрямоване на формування всебічного розуміння проблем, що перешкоджають ефективній реалізації інформаційно-аналітичного забезпечення на підприємствах.

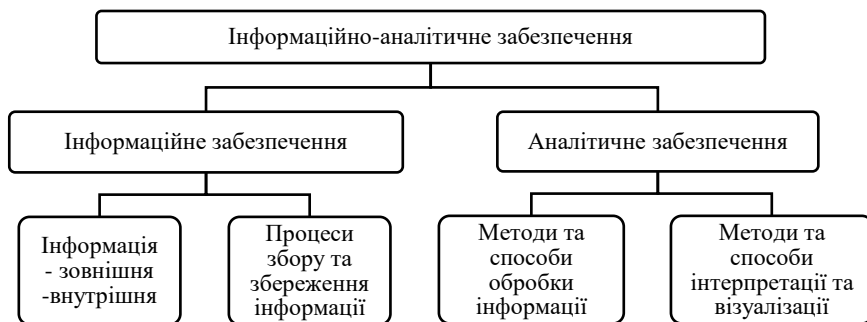
Основними завданнями дослідження є визначення критеріїв

ефективності процесу інформаційно-аналітичного забезпечення, що включають своєчасність, релевантність і доступність інформації у вигляді, необхідному для прийняття обґрунтованих рішень. Також важливим є завдання виявлення організаційних та технічних перешкод, що ускладнюють впровадження такої системи, зокрема проблеми взаємодії між підрозділами підприємства, а також труднощі інтеграції сучасних інструментів, таких як системи бізнес-аналітики (BI), великі дані та штучний інтелект. Крім того, серед основних завдань дослідження є аналіз проблем безпеки даних, як внутрішньої, так і зовнішньої, що стає все більш актуальною у зв'язку із зростанням кіберзагроз і підвищенням вартості інформації. Дослідження також охоплює завдання розробки рекомендацій щодо підвищення прозорості процесу управління на основі даних і усунення суб'єктивних та інтуїтивних складових у прийнятті управлінських рішень.

## Методологія дослідження

Інформаційно-аналітичне забезпечення представляє собою комплексне поєднання технологій, методів та інструментів, які слугують для збору, обробки, аналізу, візуалізації та інтерпретації даних (Карпенко, 2015). В процесі управління підприємством здебільшого йдеться про фінансово-економічні та технологічні дані, які у процесі інтерпретації перераховуються у певні агреговані показники (Сибірцев et al., 2023).

Виходячи з такого визначення, методологія вивчення інформаційно-аналітичного забезпечення як комплексного процесу зорієнтована на декомпозицію на локальні взаємозалежні явища та задачі. Структура інформаційно-аналітичного забезпечення наведена на рис. 1.



**Рисунок 1 – Структура інформаційно-аналітичного забезпечення**  
(Джерело: Саврас & Томаневич, 2022)

## Обговорення та аналіз

У сучасних умовах стрімкої цифровізації бізнес-середовища інформаційно-аналітичне забезпечення стало важливою складовою системи управління підприємством (Гринько & Парій, 2024). Воно забезпечує керівників і менеджерів своєчасною, релевантною і достовірною інформацією, яка необхідна для прийняття обґрунтованих рішень. Результати цього дослідження свідчать, що ефективне впровадження та використання інформаційно-аналітичного забезпечення стикається з низкою викликів, які можна умовно поділити на технічні, організаційні та безпекові аспекти.

Одним із ключових технічних викликів є інтеграція різних систем і джерел даних, які використовуються підприємством. Оскільки сучасні компанії часто застосовують кілька інформаційних систем, таких як CRM, ERP, BI-системи, важливо забезпечити їх узгодженість та стандартизацію. Недоліки в інтеграції можуть призводити до фрагментації даних і формування неповної або неточної аналітики, що ускладнює прийняття зважених рішень. Ефективна інтеграція дозволяє отримувати цілісну картину бізнес-процесів, забезпечуючи прозорість і точність управлінської інформації.

Крім того, в умовах зростання кіберзагроз і обсягу конфіденційної інформації питання інформаційної безпеки стає все більш актуальним. Ризики, пов'язані з витоком або викривленням даних, особливо критичні, коли йдеться про фінансову та комерційну інформацію (Khvalchuk, 2020). Підприємства змушені використовувати розширені заходи безпеки, що охоплюють як захист від зовнішніх атак, так і внутрішню інформаційну безпеку. Особливий виклик тут становить дистанційна робота, що потребує додаткового захисту віддаленого доступу до корпоративних систем.

Ще одним важливим аспектом є забезпечення гнучкості та адаптивності інформаційно-аналітичної системи (Скочиляс, 2019). Умови ринку швидко змінюються, і вимоги до аналітики повинні адаптуватися відповідно. Це зумовлює потребу в інтеграції інноваційних технологій, таких як штучний інтелект та машинне навчання, що дозволяє здійснювати прогнозування і проактивне реагування на зміни на ринку (Makedon et al., 2022; Vorobiova et al., 2023). Використання таких технологій сприяє підвищенню якості аналітичних даних та розширює можливості підприємства в стратегічному плануванні (Сивицька, 2024).

Нарешті, організаційні питання є критичними для успішного впровадження інформаційно-аналітичного забезпечення. Ефективне управління процесами забезпечення вимагає чіткої організації роботи між підрозділами та розподілу повноважень (Tyurina et al., 2022). Це дозволяє уникнути дублювання функцій і втрати інформації, сприяє злагодженій взаємодії між відділами та забезпечує швидкий обмін інформацією. Недоліки в організаційному підході можуть призвести до зниження ефективності та ускладнень у впровадженні інформаційно-аналітичних рішень.

Ефективне інформаційно-аналітичне забезпечення є багатогранним процесом, який потребує ретельного врахування технічних, організаційних та безпекових аспектів. Забезпечення комплексного підходу до вирішення цих

викликів сприятиме підвищенню ефективності управлінських процесів, покращенню конкурентних позицій підприємства на ринку та забезпеченню прозорості в ухваленні управлінських рішень.

## Результати дослідження

Система інформаційно-аналітичного забезпечення вважається ефективною, якщо вона вирішує такі задачі:

- надання інформації та показників саме в тому вигляді (у тих аналітиках), як вимагає замовник (користувач) інформації;
- надання інформації своєчасно, у строки, коли інформація ще є актуальною і відповідно має цінність;
- надання інформації співставно до попередніх періодів, з можливістю аналізу динаміки;
- можливість розшифрування агрегованих показників до дрібніших показників, аж до первинних облікових документів;
- технічне формування інформації в автоматичному або напівавтоматичному режимі, з мінімальним втручанням співробітників у технічні процеси підготовки та обробки інформації;
- доступна візуалізація інформації у вигляді стандартизованих звітів та дашбордів (dashboards); можливість побудови звітів співробітниками без спеціалізованих знань у галузі ІТ.

В сучасних умовах основними викликами на шляху вирішення вказаних задач є наступні:

- великий обсяг даних для аналізу. Для обробки таких обсягів даних необхідне застосування спеціалізованих програмних засобів, адже можливостей та пропускну здатності настільних систем (Microsoft Excel та ін.) часто недостатньо. Сукупність технічних, програмних та методологічних засобів обробки великих масивів даних отримала назву Big Data;
- стрімка зміна ринкових умов та відповідна зміна запитів для аналітики вимагає побудови гнучких систем з широкими можливостями створення додаткового функціоналу самостійно користувачами без участі або з мінімальною участю фахівців ІТ;
- як наслідок швидкої зміни умов, необхідність інтеграції систем бізнес-аналітики (BI, Business Intelligence) для доступної візуалізації, побудови звітів та виконання інших задач користувачами без участі співробітників ІТ-підрозділу;
- скорочення термінів підготовки інформації та відповідно вимога автоматизованого збору та обробки інформації з мінімальною участю співробітників у технічних процесах. Адже в умовах жорсткої конкуренції і непередбачуваності ринку, швидкість прийняття обґрунтованих рішень є ключовим фактором успіху;
- із підвищенням вимог щодо швидкості та гнучкості збору та обробки інформації, постає виклик залучення систем штучного інтелекту та машинного навчання (Artificial Intelligence, Machine Learning) до процесу підготовки та обробки інформації;

- питання зовнішньої інформаційної безпеки даних стає все більш актуальним, оскільки кіберзлочинність зростає відповідно до збільшення вартості інформації; конфіденційна фінансова інформація часто стає мішенню цілеспрямованих зовнішніх атак;

- значно зростають загрози внутрішньої інформаційної безпеки через перехід багатьох співробітників на дистанційну роботу з домашніх слабозахищених пристроїв та поступове підвищення рівня загальної обізнаності співробітників (в т.ч. недобросовісних) у питаннях IT;

- необхідність інтеграції різноманітних систем і платформ (системи бухгалтерського обліку, системи складського обліку WMS, системи моніторингу виробничих процесів та ЧПУ, системи обліку взаємовідносин з клієнтами CRM; системи роздрібною торгівлі та робоче місце касира, системи взаємодії з банками та державними органами та ін.);

- необхідність заміни програмних продуктів, пов'язаних із країною-агресором (1С, Вітріх та ін.);

- процес збору та обробки інформації пронизує наскрізь всю діяльність компанії і часто вимагає перебудову багатьох інших бізнес-процесів, що викликає спротив системи та організаційні проблеми взаємодії підрозділів, задіяних у руху інформації, їх мотивації та відповідальності; що часто виливається у необхідність додаткового розгортання систем документообігу та інших допоміжних інформаційних систем.

## Висновки

Інформаційно-аналітичне забезпечення в сучасних умовах є одним з найважливіших елементів, необхідних для забезпечення ефективності та прозорості процесу управління підприємством на основі даних. У разі вирішення завдань та подолання з'ясованих вище викликів, процес управління підприємством на основі даних дозволяє оперативно виявляти слабкі місця у компанії, реагувати на зміни у зовнішньому середовищі, адаптувати свої стратегії, зберігаючи при цьому прозорість та логічність процесу управління, виключаючи з нього інтуїтивну та суб'єктивну складові. Останній фактор є надзвичайно важливим, оскільки формує довіру до системи управління з боку співробітників та засновників компанії, інвесторів, регулюючих та перевіряючих органів.

Не дивлячись на те, що вказана тема може здаватися достатньо опрацьованою, в її межах існує цілий ряд задач та викликів, які вимагають подальших досліджень як в предметній області, так і в організаційній площині практичного запровадження у діяльність підприємства. В предметній області найбільш актуальними вбачаються наступні дослідження в частині вдосконалення існуючих інструментів та підходів, а також створення нових моделей та технологій збору та обробки інформації із використанням великих даних та залучення до процесу обробки систем штучного інтелекту та машинного навчання. В організаційній площині актуальним є дослідження методології побудови процесу ефективного впровадження інформаційно-аналітичного забезпечення наскрізь діяльності всієї компанії.

## Посилання

- Гринько, Т. В., & Парій, Н. М. (2024). Розвиток підприємницької діяльності в умовах цифрової трансформації. У *Економіка і менеджмент 2024: перспективи інтеграції та інноваційного розвитку* (Т. 7, С. 83–86). Видавець Біла К. О. [http://www.confcontact.com/2024-ekonomika-i-menedzhment/9\\_grynko\\_parii.pdf](http://www.confcontact.com/2024-ekonomika-i-menedzhment/9_grynko_parii.pdf)
- Гринько, Т. В., & Петриняк, У. Я. (2024). Креативні цифрові технології – основа конкурентоспроможної економіки України. У *Економіка і менеджмент 2024: перспективи інтеграції та інноваційного розвитку* (Т. 6, С. 61–64). Видавець Біла К. О. [http://www.confcontact.com/2024-ekonomika-i-menedzhment/7\\_petryniak\\_grynko.pdf](http://www.confcontact.com/2024-ekonomika-i-menedzhment/7_petryniak_grynko.pdf)
- Карпенко, Л. М. (2015). Інформаційно-аналітичне забезпечення управління бізнес-процесами підприємств: прогностична валідність. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*, 3(3), 77–85. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-61>
- Новікова, М. М., Гайдученко, С. О., Чернов, С. І., Кондратенко, Н. О., Дегтяр, О. А., Калашнікова, Х. І., Лях, Ю. І., Бельська, Т. В., Гнатенко, М. К., Швед, А. Б., Тарабан, С. В., Пастух, К. В., Мажник, Л. О., Плотницька, С. І., Магомедова, М. А., Боровик, М. В., Волкова, М. В., Запорожець, Г. В., Алхатіб, Ф., . . . Небилиця, О. А. (2020). *Теоретичні основи забезпечення якості прийняття управлінських рішень в умовах європейської інтеграції: монографія*. Друкарня Мадрид. [https://ebooks.znu.edu.ua/index.php?action=url/view&url\\_id=43193](https://ebooks.znu.edu.ua/index.php?action=url/view&url_id=43193)
- Отенко, В. І. (2014). Інформаційно-аналітичне забезпечення прийняття управлінських рішень на підприємстві. *Економіка: реалії часу*, (6), 249–252. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/econrch\\_2014\\_6\\_39](http://nbuv.gov.ua/UJRN/econrch_2014_6_39)
- Саврас, І., & Томаневич, Л. (2022). Інформаційно-аналітичне забезпечення управління інноваційною діяльністю підприємств. *Економіка та Суспільство*, 45. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-61>
- Сибірцев, В. В., Кравченко, В. П., & Подплетній, В. В. (2023). Інформаційно-аналітичне забезпечення управління фінансами в сучасних умовах розвитку. *Академічні візії* (24). <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/670>
- Сивицька, І. Г. (2024). Інформаційно-аналітичне забезпечення процесів прийняття управлінських рішень. *Інформація та соціум*, 128-130. <https://ijas.donnu.edu.ua/article/view/16325>
- Скоциляс, С. М. (2019). Аналітичне забезпечення як джерело інформації для прийняття управлінських рішень. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*, 25(2), 123–127. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvuumevcg\\_2019\\_25%282%29\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvuumevcg_2019_25%282%29_27)
- Grynko, T., & Hvinashvili, T. (2024). Strategic Business Management in the Digital Economy. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 372-376. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/126>
- Khvalchuk, I. & Voloschuk, L. (2020). Summary of information-analytical safety management of enterprise. *Economics: Time Realities*, 1(47), 84–90. <https://economics.net.ua/files/archive/2020/No1/84.pdf>
- Makedon, V. V., Krasnikova, N., Krupskiy, O. P., & Stasiuk, Y. (2022). Arrangement of digital leadership strategy by corporate structures: a review. *Ikonomicheski Izsledvania*, 31(8), 19–40. <https://tinyurl.com/2-s2-0-85143514408>
- Tyurina, N., Nazarchuk, T., & Shkabara, N. (2022). Formation of information and analytical support of business project management of the enterprise. *Innovation and Sustainability*, 2, 68–77. <https://doi.org/10.31649/ins.2022.2.68.77>
- Vorobiova, V. V., Krupskiy, O. P., & Stasiuk, Y. (2023). The Role of Digital Technologies in Modern Trade: A Study of Global Trends and Prospects for Ukraine. *Economic Journal Odessa Polytechnic University*, 2(24), 45-55. <https://doi.org/10.15276/ej.02.2023.5>

# Моделі лідерства в менеджменті крос-культурних команд

Софія Саламаніна , Ганна Нямецук 

**Purpose.** This article examines leadership models and strategies for managing cross-cultural teams. It focuses on leaders' behavioural priorities, such as task orientation, relationships, and shared leadership, and how cultural differences impact the effectiveness of formal and informal leaders. The need for an integrative leadership approach is emphasized in the context of globalisation and cross-cultural teams. **Design / Method / Approach.** A qualitative method is used, based on analysis of existing literature on leadership in project team management. **Findings.** Effective communication between leaders and team members is a key factor in project success. Overcoming linguistic barriers, understanding cultural differences, and coordinating non-verbal communication are essential for high-quality information exchange and understanding in cross-cultural teams. **Theoretical Implications.** This research contributes to understanding leadership in cross-cultural team management. Intercultural communication is crucial for building strong relationships, fostering trust, and reducing conflicts, contributing to successful goal achievement. **Practical Implications.** The study offers practical strategies for leaders, including developing intercultural sensitivity through training on cultural differences, and adopting empathy by understanding subordinates' emotional states. Adapting communication styles and using technology to enhance interaction across locations are also recommended. **Originality / Value.** This paper provides a comprehensive analysis of cross-cultural management's impact on leadership styles and strategies, offering both academic and practical insights for improving cross-cultural team management. **Research Limitations / Future Research.** The study is limited by its qualitative nature and focus on specific industries. Future research could include quantitative analysis and examine leadership in various cultural and organisational contexts. **Paper Type.** Review paper.

## Keywords:

cross-cultural leadership, leadership models, global teams, adaptability, communication, cultural differences, management

---

## Contributor Details:

Sofia Salamanina, Graduate Student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [salamanina@365.dnu.edu.ua](mailto:salamanina@365.dnu.edu.ua)

Hanna Niameshchuk, Dr.Sci, Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [niameshchuk\\_h@365.dnu.edu.ua](mailto:niameshchuk_h@365.dnu.edu.ua)

У глобалізованому світі менеджмент крос-культурних команд став невід'ємною складовою частиною успішної діяльності багатьох підприємств. Лідерство в таких командах вимагає від менеджерів гнучкості, адаптивності та розуміння культурних відмінностей, що можуть впливати на динаміку взаємодії в колективі. Моделі лідерства, що використовуються в крос-культурних командах, можуть відрізнятися від традиційних підходів, оскільки вимагають врахування різних культурних норм, цінностей і стилів спілкування.

Дослідження в цій галузі є критично важливими для розуміння того, яким має бути ефективний менеджмент крос-культурних колективів, забезпечувати продуктивність та підвищувати результати діяльності підприємств.

Метою цієї наукової роботи є вивчення моделей лідерства в менеджменті крос-культурних команд, аналіз їх впливу на взаємодію між членами команди та продуктивність проектів. Робота спрямована на розкриття основних характеристик моделей лідерства, їх адаптацію до умов крос-культурного середовища, а також на розробку практичних рекомендацій.

## **Мета та завдання**

Метою цього дослідження є визначення моделей і стратегій лідерства, що, за сучасних реалій, можуть бути найбільш придатними для управління крос-культурними командами.

Системний підхід до визначеної мети обумовив необхідність вирішення таких завдань:

- ідентифікувати основні напрями лідерства та його пріоритети в крос-культурному середовищі;
- відслідкувати характер впливу культурних відмінностей на показники ефективності роботи лідера;
- визначити особливості комунікації та основні комунікаційні бар'єри в крос-культурних командах;
- сформулювати практичні стратегії управління мультикультурними командами.

## **Матеріали та методи**

Представлена стаття спирається на результати досліджень провідних вчених царини лідерства, опубліковані в науковій літературі. Для досягнення визначеної мети і вирішення окреслених завдань використано сукупність загальнонаукових та спеціальних методів дослідження, застосування яких забезпечило ґрунтовність, об'єктивність, достовірність поданих у статті положень і сформульованих висновків. Методологічний апарат дослідження становлять діалектичний метод пізнання, систематизації, узагальнення та типологізації. Використання і комбінування згаданих методів дослідження дало змогу отримати обґрунтовані висновки та результати, які викладені у статті.



## Основні напрями лідерства та їх використання в крос-культурному середовищі

У сучасному світі менеджменту, що трансформується під впливом глобалізації, швидких технологічних змін та зростаючої конкуренції, роль лідерства стає особливо актуальною. Систематичне та широке дослідження лідерства, а також способів взаємодії між лідерами та командами, обумовило виникнення численних теорій і моделей. Існують теорії, що акцентують увагу на особистісних характеристиках лідера. Інші теорії, пов'язані з домінуючими ознаками влади та впливу, зосереджуються на застосуванні повноважень та статусу для ефекту на дії своїх підлеглих. Дослідники, які спираються на ситуаційні та контекстуальні дослідження, в першу чергу зацікавлені в аналізі поточних обставин та особистісних рис підлеглих які впливають на ефективність лідерської поведінки. Характер і якість стосунків між лідером та його командою мають вирішальне значення в рамках трансакційних теорій, в той час як атрибуції та сприйняття суспільством лідерства та його дій становлять основу атрибутивних теорій (Guterman, 2023).

Лідерство має сприяти відкритості та адаптивності в роботі колективу, створюючи простір для ефективної взаємодії, враховуючи міжкультурні відмінності. Можливо виокремити два основні пріоритети поведінки сучасного лідера у багатокультурних командах.

Перший пріоритет полягає в орієнтації на завдання, що передбачає чітке визначення ролей і обов'язків як для керівника, так і для інших членів колективу. У цій моделі лідер надає детальні інструкції, що забезпечує ефективне виконання завдань та контроль бізнес-процесів. Така поведінка, як правило, позитивно впливає на якість результатів роботи у дистанційних командах.

Другий пріоритет — орієнтація на взаємовідносини, що фокусується на комунікаційній ефективності та ментальному благополуччі членів команди. Лідер, що дотримується цього підходу, сприяє позитивній комунікаційній взаємодії між колегами, задовольняючи їх соціальні потреби і встановлюючи ширі стосунки на основі поваги. Такі лідери зосереджуються на емоційному стані працівників, що сприяє підвищенню їхньої цінності та довіри у колективі (Batırlık et al., 2022).

Однак ускладнення менеджменту у гібридному середовищі, що передбачає використання дистанційної форми роботи для крос-географічних колективів, може спонукати до розгляду концепції спільного лідерства. Спільне лідерство охоплює процеси, в яких лідерські функції розподіляються серед членів колективу, а не концентруються в одній особі. У цій моделі акцент зміщується на спільне узгодження рішень, розподіл відповідальності та активнішу взаємодію всередині команди. Спільне лідерство є більш гнучким і адаптивним у порівнянні з традиційними моделями лідерства (Pearce & Conger, 2003).

Отже, оптимальний підхід до лідерства має бути гнучким, зберігати баланс, та підтримувати умови для отримання оптимальних результатів роботи крос-культурних колективів. З метою створення стабільно функціонуючих

робочих команд, можливе впровадження двоетапної системи формального лідерства. На етапі формування та навчання лідер має зосереджуватись на досягненні комунікаційної ефективності та створенні збалансованих колективів в залежності від особистих якостей працівників, їхньої культурної приналежності тощо. Після завершення цього етапу можливо дотримуватись стратегії, орієнтованої на максимально ефективне виконання робочих завдань. Таким чином, ефективне лідерство є одним із основоположних аспектів успішного функціонування мультикультурних команд. Збалансований підхід, що поєднує акцент на завданнях, комунікації та спільному прийнятті рішень, сприяє досягненню високих результатів і одночасно підтримує позитивний психологічний клімат у колективі.

## **Вплив культурних відмінностей на ефективність роботи лідера**

Лідерство повинно враховувати культурні особливості та стилі роботи команди задля забезпечення подальшої ефективної взаємодії. Менеджмент мультикультурних команд є викликом для лідерів, оскільки культурні відмінності можуть суттєво впливати на робочі процеси, комунікацію та взаємодію в колективі. Культурний контекст визначає не лише очікування та поведінку членів команди, але й впливає на стиль лідерства.

Успішні лідери мультикультурних команд мають демонструвати високий рівень культурної компетентності, що дозволяє їм ефективно спілкуватися та приймати рішення в умовах національного різноманіття (Брусенцева, 2021). Лідери, які не враховують культурні особливості в менеджменті, можуть зіштовхнутися з конфліктами, непорозуміннями або зниженням мотивації команд, оскільки національні відмінності впливають на сприйняття лідерських якостей, таких як харизма, авторитет, або здатність йти на ризик. Дослідження доводять існування культурних кластерів, що об'єднують регіони за їхніми особливостями у сфері поведінкових особливостей та комунікації. Наприклад, в культурах з високим рівнем колективізму, що є характерними для країн Латинської Америки або Азії, участь у командних рішеннях є обов'язковою умовою для забезпечення продуктивної співпраці. Водночас у культурах з високим рівнем індивідуалізму, як у США, акцент робиться на особистих досягненнях та автономії, і лідери мають це враховувати в своїх управлінських підходах (Den Hartog & De Hoogh, 2024).

Також, слід зауважити, що керівники можуть використовувати різні стилі управління залежно від контексту, адаптуючи свої підходи до культурних норм членів команди. Наприклад, проєктний менеджер у міжнародній компанії може використовувати демократичний стиль в європейських країнах, але більш авторитарний підхід в азіатських культурах, де повага до ієрархії є більш поширеною (Zander, 2024).

Для ефективності менеджменту мультикультурних команд формальним керівникам необхідно розвивати культурну компетентність і гнучкість у підходах. Одним з підходів до вирішення є інвестування у навчання та тренінги

для покращення управлінських та комунікаційних навичок в міжкультурній взаємодії, а також використання гнучкого стилю лідерства в залежності від національного складу конкретної команди.

## **Комунікація в крос-культурних командах**

Поряд із технічними знаннями, необхідними для виконання завдань, особливе значення мають навички міжособистісного та міжкультурного спілкування. Вони сприяють об'єднанню команди та забезпечують ефективну співпрацю, а також взаємодію з лідером (Брусенцева, 2021).

Забезпечення ефективного комунікаційного процесу вимагає аналізу крос-культурних комунікативних бар'єрів в глобальних командах. Такий підхід допомагає краще розуміти труднощі та виклики, які виникають при взаємодії у мультикультурних колективах. Серед основних бар'єрів можливо виокремити наступні (Скочинець et al., 2023).

1. Лінгвістичні перешкоди, що виникають через мовні відмінності між членами команди. Мовні бар'єри можуть включати різницю в рівні знань інтернаціональних мов, що може ускладнювати обмін інформацією.

2. Культурні розбіжності, які включають різницю в нормах, цінностях, вріваннях і стереотипах між членами команди.

3. Комунікаційні стилі – різні культури демонструють відмінність у способах сприйняття та передачі інформації. Це може характеризуватись різноманітністю директивності у комунікації, або ж більш індиректними підходами до взаємодії.

4. Невербальна комунікація, що включає жести, міміку, тон голосу та інші невербальні елементи, які мають значний вплив, однак їх інтерпретація може відрізнятись.

У контексті менеджменту крос-культурних команд важливість міжособистісного лідерства не можна переоцінити. Лідери, які активно застосовують міжособистісні навички, здатні створити середовище, що сприяє розвитку команди і досягненню спільних цілей. У цьому контексті особливу увагу слід приділяти емоційному стану членів команди, оскільки розуміння та врахування емоцій може суттєво вплинути на командну динаміку. В такому контексті емпатія з боку лідера може виконувати функцію запобігання конфліктам у крос-культурних командах. Окрім того, вона також може сприяти підвищенню рівня довіри в команді (Zander, 2024).

Таким чином, окрім необхідності забезпечення якісного обміну інформацією та розуміння під час комунікації, лідерами також слід приділяти особливу увагу емоційному стану членів команди, використовуючи емпатію як ключовий інструмент для зміцнення міжособистісних відносин. Це дозволяє не лише знизити ризики конфліктів, але й підвищити рівень довіри, що є важливим для досягнення спільних цілей в умовах різноманітності культурних контекстів.

## **Практичні стратегії управління крос-культурними командами**

Менеджмент крос-культурних команд є складним завданням, яке вимагає від лідерів застосування практичних стратегій, що враховують культурні, комунікативні та міжособистісні особливості учасників. Ефективні стратегії управління можуть значно підвищити продуктивність команди, знизити ризики конфліктів і сприяти досягненню спільних цілей.

Першою стратегією покращення лідерських практик є розвиток міжкультурної чутливості. Це передбачає навчання основам культурних відмінностей, звичаїв і цінностей, що допомагає уникнути непорозумінь. Керівники повинні створити умови для обміну знаннями про культури, представлені в команді, що підвищить загальний рівень свідомості та толерантності до відмінностей. Це може досягатись проведенням тренінгів, запрошенням спеціалістів з інших компаній тощо.

Другим методом є використання емпатії в управлінні. Емпатія є ключовим елементом міжособистісного лідерства, що допомагає зміцнити відносини в крос-культурних командах. Менеджери повинні активно проявляти чуйність до емоційного стану підлеглих, розуміти їхні переживання і потреби. Це дозволяє створити сприятливу атмосферу для спілкування та співпраці.

Третім аспектом покращення стратегій менеджменту є адаптація комунікаційних стилів до культурних контекстів. Лідери мають розуміти, що різні культури мають свої специфічні способи сприйняття і передачі інформації. Це може включати різницю в директивності комунікації або використанні невербальних елементів, таких як жести та міміка. Спостерігаючи становлення мета-всесвіту, можна говорити про актуалізацію цього аспекту, оскільки вже створюються сервіси штучного інтелекту, метою яких є розпізнавання емоцій переглядача контенту за його мімікою та жестами, залежно від національної приналежності (Нямешук, 2022).

Останнім, та дуже важливим у глобальному контексті методом є використання технологій для підтримки комунікації. Лідери можуть застосовувати різноманітні платформи для організації відеоконференцій, обміну документами та спільної роботи в реальному часі. Це сприяє зміцненню зв'язків між учасниками команди, незалежно від їхнього географічного розташування, і допомагає подолати лінгвістичні та культурні бар'єри. Асиметричність технологічного розвитку країн загострює цей аспект в менеджменті крос-культурних команд (Видря & Нямешук, 2022).

## **Висновки**

У представленій роботі розглянуто ключові аспекти менеджменту крос-культурних команд в умовах сучасної глобалізації. Зростаюча інтеграція міжнародного бізнесу та різноманітність культурних контекстів вимагають від лідерів нових підходів і стратегій для забезпечення ефективної роботи

команд. Установлено, що міжкультурна комунікація є основоположним елементом у формуванні здорових міжособистісних відносин. Лідери, які розуміють та враховують культурні відмінності, здатні створити атмосферу довіри і співпраці, що знижує ризики конфліктів та сприяє досягненню спільних цілей. Використання емпатії, адаптація комунікаційних стилів та встановлення відкритих каналів комунікації є важливими стратегіями для менеджменту мультикультурних команд.

Окрім того, застосування сучасних технологій для підтримки комунікації є незамінним у глобальному бізнесі, адже вони дозволяють зберігати зв'язок між учасниками команди, незважаючи на географічні бар'єри.

У підсумку, менеджмент крос-культурних команд є комплексним і складним, що вимагає від лідерів поєднання знань, чуйності та практичних навичок.

## References

- Batırlık, S. N., Gencer, Y. G., & Akkucuk, U. (2022). Global Virtual Team Leadership Scale (GVTLS) Development in Multinational Companies. *Sustainability*, 14(2), 1038. <https://doi.org/10.3390/su14021038>
- Den Hartog, D. N., & De Hoogh, A. H. B. (2024). Cross-Cultural Leadership: What We Know, What We Need to Know, and Where We Need to Go. *Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior*, 11(1), 535–566. <https://doi.org/10.1146/annurev-orgpsych-110721-033711>
- Gutterman, A. (2023). Cross-Cultural Leadership Studies. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4560467>
- Pearce, C., & Conger, J. (2003). *Shared Leadership: Reframing the Hows and Whys of Leadership*. SAGE Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781452229539>
- Zander, L. (2024). Interpersonal Leadership Across Cultures: A Historical Exposé and a Research Agenda. In *International Business Research: Culture, Work, Employment, and Leadership* (pp. 38–61). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003459903-5>
- Брусенцева, О. (2021). Управління мультикультурними командами в проектах. In *Економічні, соціальні та інформаційні механізми формування та вдосконалення системи управління проектами* (pp. 209–225). ДЗВО «Університет менеджменту освіти». <http://surl.li/rquqwc>
- Видря, М. А., & Нямешук, Г. В. (2022). Асиметрії високотехнологічного розвитку країн. In *Глобальна безпека та асиметричність світового господарства в умовах нестабільного розвитку економічних систем* (pp. 53–56). ЦНТУ. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12346>
- Нямешук, Г. В. (2022). Еволюція цифрового суспільства: перехід до meta-всесвіту. In *Економіко-правові та соціально-технічні напрями еволюції цифрового суспільства* (Vol. 2, pp. 222–224). Університет митної справи та фінансів. <http://surl.li/lfadkw>
- Скочинець, А. А., Мандибура, Р. Є., Петрович, В. П., Садонцев, Д. У., & Процик, Н. О. (2023). Шляхи подолання крос-культурних комунікативних бар'єрів у мультикультурній корпорації. *Scientific notes of Lviv University of Business and Law*, (38), 230–236. <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/1267>

# Багатогранність токенів у підприємницьких екосистемах: нові горизонти аксіології цифрових активів

Роман Павлов , Тетяна Павлова 

**Purpose.** This study aims to explore the multifaceted nature of tokens in entrepreneurial ecosystems and their impact on value creation and distribution processes, as well as to develop a conceptual framework integrating token economics, entrepreneurship, and digital asset axiology. **Design / Method / Approach.** The research employs a comprehensive literature review and synthesizes existing theories to develop a novel conceptual model. It systematizes the roles and functions of tokens in entrepreneurial ecosystems and analyzes their influence on value creation mechanisms. **Findings.** The study reveals that tokens serve as multifunctional tools for financing, governance, incentivization, and value representation in digital ecosystems. It identifies key aspects of tokenization's impact on value creation, including democratization of investment access, increased liquidity of intangible assets, and emergence of new monetization models. The proposed conceptual model integrates token economics, entrepreneurship, and axiology, offering a holistic view of tokenized ecosystems. **Theoretical Implications.** This research expands the understanding of tokens as complex socio-technical constructs and necessitates a revision of value creation theories in the context of tokenized ecosystems. **Practical Implications.** The findings suggest that entrepreneurs and investors should consider the multifaceted nature of tokens when developing and evaluating business models in the digital economy. The study also highlights the need for new competencies in token economics and tokenized ecosystem management. **Originality / Value.** The proposed conceptual model provides a novel theoretical framework for analyzing tokenized ecosystems, considering their complex socio-technical nature and interdisciplinary character. **Research Limitations / Future Research.** Future studies should empirically test the proposed conceptual model across various types of tokenized projects and explore the long-term socio-economic consequences of widespread tokenization adoption. **Paper Type.** Conceptual paper.

## Keywords:

token economics, entrepreneurial ecosystems, digital asset axiology, value creation in tokenized systems, blockchain-based business models, gnoseology of digital assets

## Contributor Details:

Roman Pavlov, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [pavlov\\_r@365.dnu.edu.ua](mailto:pavlov_r@365.dnu.edu.ua)

Tetiana Pavlova, Prof., Dr.Sc., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [pavlova\\_t@365.dnu.edu.ua](mailto:pavlova_t@365.dnu.edu.ua)



Розвиток блокчейн-технологій і поява криптоактивів створили нову парадигму у сфері підприємництва та економіки. Токени, як багатофункціональні цифрові активи, відіграють ключову роль у формуванні нових бізнес-моделей, механізмів управління та способів створення цінності в цифрових екосистемах. Однак їхня багатогранна природа і вплив на підприємницькі процеси залишаються недостатньо вивченими в рамках наявних теоретичних підходів.

Актуальність цього дослідження зумовлена кількома факторами. По-перше, стрімкий розвиток токенизації вимагає переосмислення традиційних концепцій цінності, власності та економічних відносин (Chen & Bellavitis, 2020). По-друге, токени відкривають нові можливості для підприємництва, створюючи інноваційні механізми фінансування, управління та взаємодії між учасниками екосистем (Fisch, 2019). По-третє, різноманіття типів і функцій токенів створює складну картину їхньої ролі в підприємницьких екосистемах, що потребує комплексного теоретичного осмислення (Oliveira et al., 2018).

Наявні дослідження в галузі токенів і криптоактивів часто фокусуються на суто технічних аспектах їхнього функціонування або на їхніх фінансових характеристиках. Наприклад, роботи Catalini and Gans (2018) і Howell et al. (2020) розглядають токени переважно як інструменти фінансування. Інші дослідники, такі як Davidson et al. (2018), аналізують токени з точки зору їхнього впливу на інституційні структури. Однак комплексний аналіз багатогранної природи токенів у контексті підприємницьких екосистем та їхнього впливу на процеси створення та розподілу цінності залишається недостатньо розробленим.

## **Теоретичне підґрунтя: синтез токеноміки, підприємницьких екосистем та аксіології цифрових активів**

Теоретичне підґрунтя цього дослідження становлять кілька взаємопов'язаних галузей: теорія підприємницьких екосистем, економіка токенів (токеноміка) та аксіологія цифрових активів.

Теорія підприємницьких екосистем, розвинута в роботах Spigel (2017) і Autio et al. (2018), надає рамку для розуміння складних взаємодій між різними акторами, інститутами та ресурсами в процесі створення і розвитку нових підприємств. У контексті токенизованих екосистем така теорія допомагає осмислити, як токени впливають на динаміку взаємодій між різноманітними учасниками і трансформують традиційні ролі в підприємницькому процесі.

Економіка токенів або токеноміка – це галузь досліджень, що розвивається і фокусується на економічних принципах і механізмах, що лежать в основі створення та функціонування токенів. Роботи Chen & Bellavitis (2020) і Oliveira et al. (2018) заклали основу для розуміння токенів як багатофункціональних інструментів.

Аксіологія цифрових активів є новим напрямом досліджень, який розглядає питання цінності та оцінки в контексті цифрової економіки. Роботи Voshmgir (2020) і Zetsche et al. (2019) зробили значний внесок у розуміння того, як токени трансформують традиційні уявлення про цінність і створюють нові форми економічних відносин. Також варто відзначити наше нещодавнє дослідження, в якому ми розглядали онтологію цифрових об'єктів і технологічну нормативність у контексті цифрової етики, що має важливе значення для розуміння етичних аспектів розвитку криптоактивів і блокчейн-технологій (Павлова & Павлов, 2024).

Інтеграція таких теоретичних підходів дає змогу сформуванню комплексне бачення ролі токенів у підприємницьких екосистемах та їхнього впливу на процеси створення і розподілу цінності.

## Систематизація ролей і функцій токенів у підприємницьких екосистемах

Багатогранна природа токенів у підприємницьких екосистемах вимагає систематичного підходу до аналізу їхніх ролей і функцій. Така систематизація дає змогу не тільки краще зрозуміти потенціал токенів як інструментів цифрової економіки, але й виявити нові можливості для інновацій та створення цінності. На основі аналізу наявної літератури та практичних прикладів, ми пропонуємо класифікацію ролей і функцій токенів (табл. 1), що відображає багатоаспектність таких активів, демонструючи їхнє значення не лише як фінансових інструментів, але й як механізмів управління, стимулювання та репрезентації цінності.

**Таблиця 1 – Ролі та функції токенів у підприємницьких екосистемах (Джерело: розроблено авторами на основі Павлов & Павлова, 2024; Zavolokina et al., 2024; Chod & Lyandres, 2021; Chen & Bellavitis, 2020; Momtaz, 2020; Voshmgir, 2020; Zook & Grote, 2020; Oliveira et al., 2018)**

Роль токена	Функції	Приклади
Фінансовий інструмент	Залучення капіталу	Токени ICO/IEO
	Ліквідність активів	Інвестиційні токени
	Інвестиційний інструмент	Стейблкоїни
Механізм управління	Право голосу	Токени управління
	Розподіл ресурсів	
	Прийняття рішень	
Утилітарний інструмент	Доступ до сервісів	Утилітарні токени
	Оплата послуг	
	Програмовані функції	
Репрезентація цінності	Цифрові активи	NFT
	Токенізація реальних активів	
	Програмована власність	
Інструмент стимулювання	Мотивація учасників	Токени в play-to-earn іграх
	Розподіл винагород	
	Алгоритмічне стимулювання	



Зазначена систематизація демонструє багатогранність токенив у підприємницьких екосистемах, що виходить за межі простих та звичайних цифрових активів. Токени виступають як комплексні інструменти, що поєднують у собі фінансові, управлінські, утилітарні та стимулюючі функції, даючи змогу сучасним підприємцям комбінувати різні їхні властивості для створення інноваційних бізнес-моделей. Однак це також ставить нові виклики перед регуляторами і вимагає переосмислення традиційних економічних концепцій.

## **Вплив токенизації на процеси створення та розподілу цінності**

Токенизація, як процес перетворення права на актив у цифровий токен, має глибокий вплив на фундаментальні механізми створення та розподілу цінності в економіці. Вона трансформує традиційні економічні відносини та створює нові парадигми цінності. Основні аспекти такого впливу токенизації включають:

1. Демократизація доступу до інвестицій. Токени дозволяють більш широкому колу суб'єктів брати участь у фінансуванні проєктів на ранніх стадіях, що потенційно може знизити бар'єри входу на ринок венчурного капіталу (Fisch, 2019).

2. Ліквідність нематеріальних активів. Токенизація дає можливість створювати (організовувати) ринки з досить високим рівнем ліквідності для раніше неліквідних активів, таких як інтелектуальна власність або права на майбутні доходи (O'Dair, 2019).

3. Автоматизація розподілу цінності. Смарт-контракти забезпечують програмований та достатньо прозорий розподіл доходів між наявними учасниками відповідної екосистеми, що може значно знизити транзакційні витрати (Cong & He, 2019).

4. Нові моделі монетизації. Токени дають змогу монетизувати різні форми участі користувачів в екосистемах, створюючи нові джерела цінності (Hisseine et al., 2022; Kumar et al, 2024).

5. Трансформація ланцюжків створення цінності: Токенизація дає змогу усунути посередників і створити ефективніші прямі зв'язки між виробниками та споживачами (Voshmgir, 2020).

Таким чином, вплив токенизації на процеси створення та розподілу цінності має багатоаспектний характер. Від демократизації доступу до інвестицій і до трансформації ланцюжків створення цінності, токенизація перевизначає фундаментальні економічні концепції та механізми, що створює цілу низку нових потенційних можливості для інновацій та економічного зростання, але також ставить серйозні виклики перед наявними бізнес-моделями та регуляторними системами. Розуміння таких змін критично важливе для підприємців, інвесторів і політиків у контексті цифрової економіки, що розвивається.

## Концептуальна модель інтеграції токеноміки, підприємництва та аксіології

Комплексне розуміння ролі токенів у підприємницьких екосистемах потребує інтеграції різних теоретичних перспектив. Авторами запропонована концептуальна модель, яка об'єднує ключові аспекти токеноміки, підприємництва та аксіології цифрових активів, забезпечуючи цілісне бачення токеномізованих підприємницьких екосистем із врахуванням їхніх економічних, соціальних, технологічних та етичних вимірів. Детальний опис кожного рівня наведено в табл. 2.

**Таблиця 2 – Структура концептуальної моделі токеномізованих екосистем (Джерело: розроблено авторами)**

Рівень	Ключові компоненти	Основні функції та характеристики
Токеномічний	Механізми емісії токенів	1. Формування основи для створення та циркуляції цінності. 2. Визначення економічних правил функціонування токенів. 3. Інтеграція з наявними фінансовими системами.
	Розподіл токенів	
	Економічні моделі токенів	
	Взаємодія з традиційними фінансовими інструментами	
Підприємницький	Нові бізнес-моделі на основі токенів	1. Трансформація підприємницьких практик. 2. Створення інноваційних способів монетизації. 3. Розробка нових форм взаємодії з користувачами.
	Стратегії залучення й утримання користувачів	
	Управління токеномізованими проєктами	
Аксіологічний	Трансформація уявлень про цінності	1. Переосмислення концепцій цінності в цифровому просторі. 2. Встановлення етичних норм використання токенів. 3. Розвиток нових форм соціальних взаємодій.
	Етичні аспекти використання токенів	
	Формування соціального капіталу	
Інституціональний	Формування нових норм і правил	1. Створення регуляторних рамок для токеномізованих екосистем. 2. Адаптація наявних інститутів до нових реалій. 3. Формування децентралізованих механізмів управління.
	Взаємодія з традиційними інститутами	
	Розвиток саморегульованих спільнот	
Технологічний	Розвиток блокчейн-інфраструктури	1. Забезпечення технологічної основи для функціонування токенів. 2. Підвищення ефективності та безпеки токеномізованих систем. 3. Створення умов для масового впровадження токенизації.
	Інтеграція з іншими передовими технологіями	
	Вирішення проблем масштабованості та інтероперабельності	

Зазначена модель складається з п'яти взаємопов'язаних рівнів, кожен з яких відіграє важливу роль у формуванні та функціонуванні токенизованих екосистем. Взаємозв'язки між рівнями моделі є багатовимірними та динамічними. Токеномічний рівень створює фундамент для підприємницьких ініціатив, які, своєю чергою, впливають досить суттєво на формування ціннісних орієнтирів в аксіологічному вимірі. Аксіологічні аспекти формують відповідні етичні норми та соціальний капітал, що впливає на інституціональний рівень. Інституціональні рамки визначають напрями технологічного розвитку, який, своєю чергою, відкриває нові потенційні можливості для всіх інших рівнів.

Дана модель демонструє, що токени є не просто технологічними артефактами, а складними соціотехнічними конструктами, що впливають на всі аспекти підприємницької діяльності та створення цінності в цифровій економіці. Вона дає змогу аналізувати розвиток токенизованих екосистем комплексно, враховуючи взаємодію економічних, соціальних, етичних і технологічних чинників.

Запропонована концептуальна модель наголошує на необхідності міждисциплінарного підходу до вивчення та розвитку токенизованих екосистем з огляду на їхню складну природу та широкий спектр впливу на різні аспекти економічної та соціальної діяльності.

## Обговорення

Результати дослідження дають змогу зробити низку важливих висновків щодо ролі токенів у підприємницьких екосистемах та їхнього впливу на процеси створення і розподілу цінності.

По-перше, багатогранність токенів, виявлена під час систематизації їхніх ролей і функцій, вказує на необхідність перегляду традиційних підходів до аналізу цифрових активів. Токени виходять за рамки простих фінансових інструментів, стаючи комплексними механізмами управління, стимулювання та репрезентації цінності, що узгоджується з висновками Chen and Bellavitis (2020) щодо трансформативної ролі токенів у децентралізованих бізнес-моделях, але розширює розуміння їхніх функцій за межі фінансової сфери.

По-друге, вплив токенизації на процеси створення та розподілу цінності демонструє досить значний потенціал для суттєвої трансформації характеру економічних відносин. Певна демократизація доступу до інвестицій і нові моделі монетизації, виявлені в дослідженні, підтверджують ідею Fisch (2019), що токени є важливими інструментами демократизації підприємницького фінансування. Однак наші результати також вказують на більш глибокі зміни в самій природі цінності та способах її створення в цифрових екосистемах.

Запропонована нами концептуальна модель інтеграції токеноміки, підприємництва та аксіології являє собою досить новий теоретичний підхід до розуміння токенизованих підприємницьких екосистем. На відміну від наявних моделей, які фокусуються переважно на технічних або економічних

аспектах токенів (наприклад, Oliveira et al., 2018), в нашій моделі пропонується більш цілісний погляд, що враховує соціальні, інституційні та етичні виміри токенизації.

Особливу увагу варто приділити аксіологічному рівню моделі, який відображає трансформацію уявлень про цінності в контексті токенизації, що узгоджується з ідеями Voshmgir (2020) про токенизовану економіку, але йде далі, розглядаючи етичні імплікації та формування нових форм соціального капіталу в токенизованих екосистемах.

Інституціональний рівень моделі підкреслює важливість взаємодії нових форм організації, заснованих на токенах, з наявними інститутами, що розвиває ідеї Davidson et al. (2018) про блокчейн як інституційну технологію, але фокусується на специфіці токенизованих екосистем.

Технологічний рівень моделі вказує на необхідність подальшого розвитку інфраструктури для реалізації повного потенціалу токенизованих екосистем, що узгоджується з висновками Xu et al. (2019) щодо технічних викликів у сфері блокчейн-додатків, але розглядає їх у ширшому контексті підприємницьких екосистем.

Важливо зазначити, що запропонована модель не є статичною. Вона відображає динамічну природу токенизованих екосистем, де взаємодія між різними рівнями може призводити до появи нових форм організації та створення цінності.

Теоретичні імплікації цього дослідження включають:

1. Розширення розуміння природи токенів як багатовимірних соціо-технічних конструктів, що вимагає міждисциплінарного підходу до їх ретельного вивчення.

2. Необхідність перегляду наявних теорій створення та розподілу цінності в контексті токенизованих підприємницьких екосистем, а також важливість інтеграції етичних і соціальних аспектів в аналіз токеноміки та цифрового підприємництва.

Практичні імплікації дослідження включають:

1. Необхідність для підприємців та інвесторів враховувати багатогранну природу токенів під час розроблення та оцінювання бізнес-моделей у цифровій економіці.

2. Важливість розвитку нових компетенцій у сфері токеноміки та управління токенизованими екосистемами, а також доцільність розроблення нових підходів до регулювання токенизованих активів та екосистем, що враховують їхню комплексну природу.

## Висновки

Токени в підприємницьких екосистемах є багатогранними інструментами, що виконують важливі функції фінансування, управління, стимулювання та репрезентації цінності. Їхня роль виходить далеко за рамки простих цифрових активів, трансформуючи фундаментальні аспекти економічних відносин.

Токенизація істотно впливає на процеси створення і розподілу цінності,

сприяючи демократизації доступу до інвестицій, підвищенню ліквідності нематеріальних активів, автоматизації розподілу доходів і появи нових моделей монетизації.

Запропонована авторами концептуальна модель інтеграції токеноміки, підприємництва та аксіології надає достатньо нову теоретичну рамку для аналізу токенизованих екосистем, що враховує їхню складну соціотехнічну природу.

Результати роботи роблять внесок у розвиток теорії цифрового підприємництва і токеноміки, пропонуючи більш комплексне розуміння ролі токенів у сучасній економіці, і відкривають нові напрями для майбутніх досліджень, у тому числі:

1. Емпіричну перевірку запропонованої концептуальної моделі на прикладі різних типів токенизованих проєктів.

2. Дослідження довгострокових соціально-економічних наслідків широкого впровадження токенизованих моделей.

3. Аналіз етичних аспектів та соціальних імплікацій токенизації різних сфер економічної діяльності.

4. Вивчення взаємодії токенизованих і традиційних економічних систем у контексті глобальної цифрової трансформації.

Багатогранність токенів відкриває нові горизонти не тільки для підприємництва, але й для переосмислення фундаментальних економічних і соціальних концепцій. З розвитком цієї галузі ми можемо очікувати на появу досить нових форм організації економічної діяльності, які можуть трансформувати наше розуміння цінності, власності та соціально-економічних відносин загалом. Токенизація як феномен не обмежується лише економічною сферою, а має потенціал для трансформації широкого спектру соціальних взаємодій.

## Посилання

- Autio, E., Nambisan, S., Thomas, L. D., & Wright, M. (2018). Digital affordances, spatial affordances, and the genesis of entrepreneurial ecosystems. *Strategic Entrepreneurship Journal*, 12(1), 72-95. <https://doi.org/10.1002/sej.1266>
- Catalini, C., & Gans, J. S. (2018). *Initial coin offerings and the value of crypto tokens* (NBER Working Paper No. 24418). National Bureau of Economic Research. <https://www.nber.org/papers/w24418>
- Chen, Y., & Bellavitis, C. (2020). Blockchain disruption and decentralized finance: The rise of decentralized business models. *Journal of Business Venturing Insights*, 13, e00151. <https://doi.org/10.1016/j.jbvi.2019.e00151>
- Chod, J., & Lyandres, E. (2021). A theory of ICOs: Diversification, agency, and information asymmetry. *Management Science*, 67(10), 5969-5989. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2020.3754>
- Cong, L. W., & He, Z. (2019). Blockchain disruption and smart contracts. *The Review of Financial Studies*, 32(5), 1754-1797. <https://doi.org/10.1093/rfs/hh2007>
- Davidson, S., De Filippi, P., & Potts, J. (2018). Blockchains and the economic institutions of capitalism. *Journal of Institutional Economics*, 14(4), 639-658. <https://doi.org/10.1017/S1744137417000200>
- Fisch, C. (2019). Initial coin offerings (ICOs) to finance new ventures. *Journal of Business*

- Venturing*, 34(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2018.09.007>
- Hisseine, M. A., Chen, D., & Yang, X. (2022). The application of blockchain in social media: A systematic literature review. *Applied Sciences*, 12(13), 6567. <https://doi.org/10.3390/app12136567>
- Howell, S. T., Niessner, M., & Yermack, D. (2020). Initial coin offerings: Financing growth with cryptocurrency token sales. *The Review of Financial Studies*, 33(9), 3925-3974 <https://doi.org/10.1093/rfs/hhz131>
- Kumar, T., Peddi, S., Animesh, R., Christ, Y., Piyas, M., & Walia, A. (2023). Impact of blockchain on social networking sites. *IRE Journals*, 6(10), 367-382. <https://www.irejournals.com/formatedpaper/1704296.pdf>
- Momtaz, P. P. (2020). Initial coin offerings. *PLoS ONE*, 15(5), e0233018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233018>
- O'Dair, M. (2019). *Distributed creativity: How blockchain technology will transform the creative economy*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00190-2>
- Oliveira, L., Zavolokina, L., Bauer, I., & Schwabe, G. (2018). *To Token or not to Token: Tools for Understanding Blockchain Tokens*. In International Conference of Information Systems (ICIS 2018), San Francisco, USA, 12 December 2018 - 16 December 2018, ICIS. <https://doi.org/10.5167/uzh-157908>
- Spigel, B. (2017). The relational organization of entrepreneurial ecosystems. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 41(1), 49-72. <https://doi.org/10.1111/etap.12167>
- Voshmgir, S. (2020). *Token economy: how the Web3 reinvents the internet* (Second edition). BlockchainHub Berlin. <https://github.com/Token-Economy-Book/EnglishOriginal>
- Xu, X., Weber, I., & Staples, M. (2019). *Architecture for blockchain applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03035-3>
- Zavolokina, L., Bauer-Hänsel, I., Hacker, J., & Schwabe, G. (2024). Organizing for value creation in blockchain information systems. *Information and Organization*, 34(3), 100522. <https://doi.org/10.1016/j.infoandorg.2024.100522>
- Zetsche, D. A., Buckley, R. P., Arner, D. W., & Föhr, L. (2019). The ICO gold rush: It's a scam, it's a bubble, it's a super challenge for regulators. *Harvard International Law Journal*, 60(2), 267-315. [https://journals.law.harvard.edu/ilj/wp-content/uploads/sites/84/3\\_ICO\\_60.2.pdf](https://journals.law.harvard.edu/ilj/wp-content/uploads/sites/84/3_ICO_60.2.pdf)
- Zook, M., & Grote, M. H. (2020). Initial coin offerings: Linking technology and financialization. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 52(8), 1560-1582. <https://doi.org/10.1177/0308518X20954440>
- Павлов, Р. А., & Павлова, Т. С. (2024). Від біткоіна до смарт-контрактів: підприємництво та філософія цінності в епоху криптоактивів. In В. Т. Гринько (Ред.), *Економічні детермінанти та конкурентні стратегії розвитку сучасних бізнес-структур: монографія* (с. 341-407). Видавець Біла К. О. [https://confcontact.com/2024-kolektyvna-monographiya/kolektyvna\\_monohrafiia\\_2024.pdf](https://confcontact.com/2024-kolektyvna-monographiya/kolektyvna_monohrafiia_2024.pdf)
- Павлова, Т. С., & Павлов, Р. А. (2024). Онтологія цифрових об'єктів і технологічна нормативність: нові перспективи для цифрової етики. *Epistemological Studies in Philosophy, Social and Political Sciences*, 7(1), 86-96. <https://doi.org/10.15421/342419>

# Аналіз електронної комерції як драйвера глобалізації: можливості для бізнесу та ризику

Валерія Воробйова , Олександр Крупський 

**Purpose.** This paper analyzes the role of e-commerce as a driver of globalization, focusing on its opportunities and risks. By examining the evolution of e-commerce and its impact on global trade, the study explores how businesses can use e-commerce to expand into international markets while managing risks. **Design / Method / Approach.** This qualitative research reviews academic literature, reports, and case studies on e-commerce and globalization. It analyzes platforms like Amazon and Alibaba, along with technological advancements such as digital payments and mobile commerce. The study highlights SMEs that have entered global markets through e-commerce. **Findings.** E-commerce lowers barriers to market entry, allowing businesses to compete globally by enhancing logistics, payment solutions, and customer engagement tools. **Theoretical Implications.** This research contributes to the theoretical understanding of globalization by showing how digital platforms enable cross-border trade. It also adds to the literature on e-commerce by highlighting its role as a facilitator of economic integration. **Practical Implications.** For businesses looking to expand internationally, this paper offers practical insights into leveraging e-commerce for growth. It emphasizes the importance of adopting robust cybersecurity measures, understanding local regulations, and conducting market research to tailor products and services to diverse cultural contexts. **Originality / Value.** The originality of this paper lies in its comprehensive examination of both the opportunities and risks associated with e-commerce in the context of globalization. By focusing on real-world examples and providing actionable recommendations for mitigating risks, it offers value to both academics and practitioners in the fields of international business and digital commerce. **Research Limitations / Future Research.** The research is limited by its focus on qualitative data and specific case studies. Future research could expand to include quantitative analyses of the financial performance of businesses that have successfully globalized through e-commerce. **Paper Type.** Review paper.

## Keywords:

E-commerce, globalization, international markets, digital economy, cybersecurity, cross-border trade, SMEs, digital platforms, business innovation

## Contributor Details:

Valeriia V. Vorobiova, Undergraduate Student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, vorobiova.v@365.dnu.edu.ua

Oleksandr P. Krupskyi, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, krupskyy71@gmail.com

Електронна комерція (e-commerce) визначається як складова цифрової економіки, яка охоплює будь-які види ділової діяльності, що здійснюються в цифровій формі через інтернет або інші електронні мережі (Березовська & Кириченко, 2022).

Основні види економічної діяльності, що належать до електронної комерції, були виділені Комісією ООН з права міжнародної торгівлі. До них належать: електронний обмін даними (Electronic Data Interchange, EDI); електронні перекази коштів (Electronic Funds Transfer, EFT); електронна торгівля (e-trade); електронні гроші (e-cash); електронний маркетинг (e-marketing); електронний банкінг (e-banking); електронне страхування (e-insurance) (UNCITRAL, 1999).

## **Мета та завдання дослідження**

Метою цього дослідження є аналіз ролі електронної комерції як рушійної сили глобалізації, з особливою увагою до можливостей, які вона відкриває, та ризиків, з якими пов'язана. У ході дослідження розглянуто еволюцію електронної комерції та її вплив на глобальну торгівлю. Це дослідження має на меті виявити, як компанії можуть використовувати електронну комерцію для виходу на міжнародні ринки, а також вивчити способи управління ризиками, пов'язаними з такою діяльністю.

Для досягнення мети було визначено такі завдання:

- Проаналізувати роль електронної комерції як ключового драйвера глобалізації та визначити, які можливості вона відкриває для бізнесу.
- Вивчити вплив розвитку електронної комерції на глобальну торгівлю, зокрема, на зниження бар'єрів для виходу на міжнародні ринки.
- Дослідити, як платформи електронної комерції, такі як Amazon і Alibaba, сприяють розширенню малого та середнього бізнесу на міжнародні ринки.
- Оцінити технологічні досягнення, включно з цифровими платіжними системами та мобільною комерцією, та їхню роль у стимулюванні глобальних економічних процесів.
- Визначити основні ризики, пов'язані з електронною комерцією.
- Запропонувати стратегії управління ризиками, які допоможуть компаніям ефективно використовувати електронну комерцію для виходу на глобальні ринки.

## **Методологія дослідження**

Це дослідження використовує якісний підхід, заснований на аналізі наукової літератури, звітів та кейсів, які стосуються розвитку електронної комерції та її впливу на глобалізацію. Методологія включає огляд платформ електронної комерції, таких як Amazon і Alibaba, а також технологічних досягнень, включно з цифровими платіжними системами та мобільною комерцією. Особливу увагу приділено прикладам малого та середнього бізнесу, які успішно вийшли на міжнародні ринки завдяки електронній комерції.



## Історичний розвиток електронної комерції

Історія розвитку електронної комерції бере свій початок у 1960-х роках, коли великі корпорації почали використовувати системи електронного обміну даними (EDI) для передачі інформації. У 1970-х роках з'явилися системи електронних переказів коштів (EFT), які дозволили банкам здійснювати транзакції без використання паперових чеків. У 1980-х роках компанії почали експериментувати з онлайн-продажами, і CompuServe (CompuServe, 2024) можна вважати першим великим інтернет-сервісом в електронній торгівлі. У 1991 році Інтернет став доступним для комерційного використання, що дало поштовх більш стрімкому розвитку електронної комерції. В 1994 році було здійснено першу безпечну онлайн-покупку, а у 1995 році з'явилися такі гіганти, як Amazon (2024) і eBay (2024). З початку 2000-х років електронна комерція продемонструвала значне зростання завдяки таким платіжним системам, як PayPal (2024), та рекламним інструментам Google AdWords. У 2010-х роках через розповсюдження смартфонів набула популярності мобільна комерція (m-commerce), а соціальні мережі стали новим каналом для продажу товарів. Подальша доступність ШІ спричинила новий виток цифровізації бізнесів (Воробйова & Чернявська, 2023)..

Пандемія COVID-19 у 2020 році прискорила перехід багатьох компаній до онлайн-торгівлі (Yeganeh, 2021), онлайн-навчання (Vivek, 2023) та дистанційної роботи (Phillips, 2020), що стимулювало стрімке зростання електронної комерції. Використання штучного інтелекту та інших новітніх технологій дозволило компаніям створювати більш персоналізовані пропозиції та спростило процеси, пов'язані з обробкою замовлень. Сучасна електронна комерція характеризується високим рівнем глобалізації. Логістичні системи стали більш гнучкими, що дозволило забезпечувати швидшу доставку товарів по всьому світу. Організації «змушені» переходити у цифрову площину ведення бізнесу (Makedon, 2022) щоб залишатися конкурентоспроможними на своєму ринку.

## Вплив електронної комерції на глобалізацію

Глобалізація – процес всесвітньої економічної, політичної та культурної інтеграції та уніфікації (Shyshkina, 2023). Глобалізація є складним і багатовимірним процесом, який збільшує ступінь взаємозалежності і взаємодії між національними економіками. Він може здійснюватися у вигляді міжнародної торгівлі, фінансових потоків, міграції, поширення технологій, культурного обміну та інших форм. Це, в свою чергу, призводить до формування єдиного глобального простору, де різні суб'єкти активно взаємодіють і впливають один на одного.

Електронна комерція відіграє ключову роль у цьому процесі, адже вона знижує бар'єри для виходу на нові ринки, дозволяючи компаніям з різних країн взаємодіяти і конкурувати на глобальному рівні (Vorobiova et al., 2023).

Завдяки спеціальним платформам, наприклад, Amazon (2024) чи Alibaba (2024), малі та середні підприємства можуть легко виходити на міжнародні

ринки, залучаючи клієнтів з різних країн. Це надає бізнесу можливість для розширення своєї аудиторії, збільшення обсягу продажів і пошуку нових шляхів зростання.

## **Можливості та переваги електронної комерції**

Здійснення продажів онлайн дозволяє компаніям знижувати витрати на утримання фізичних магазинів, а завдяки автоматизації багатьох бізнес-процесів підприємства можуть зменшити свої операційні витрати, що позитивно впливає на прибутковість (Krupskiy, 2023).

Електронна комерція дозволяє компаніям надавати своїм клієнтам персоналізовані послуги. За допомогою аналітики даних можна адаптувати пропозиції відповідно до інтересів і поведінки споживачів. Зручність онлайн-покупок і наявність різноманітних способів оплати та доставки значно підвищує рівень задоволеності клієнтів і, як наслідок, їх лояльність.

Ще однією перевагою електронної комерції є стимулювання інновацій, що сприяє появі нових бізнес-моделей. Яскравим прикладом є дропшипінг (пряме постачання) – вид співпраці, при якому продавець не закуповує товар, а передає замовлення постачальнику, який відправляє замовлення клієнту напряму. Ця модель бізнесу стала популярною завдяки простоті запуску та відсутності потреби у стартовому капіталі (Тримбовецький, 2021).

## **Ризики та виклики в електронній комерції**

Окрім великої кількості нових можливостей, які відкриває для бізнесу електронна комерція, існують певні ризики, пов'язані з веденням цієї діяльності.

Одним з найбільших ризиків, що виникають у електронній комерції, є загрози, пов'язані з кібербезпекою. Кібератаки можуть призвести до втрати важливих даних, значних фінансових збитків та підризу довіри клієнтів. Саме тому сучасним компаніям слід постійно інвестувати у розвиток сучасних технологій захисту для попередження цих ризиків.

Електронна комерція стикається і з численними правовими і регуляторними викликами, які можуть суттєво варіюватися в залежності від географічного положення. Різні норми захисту прав споживачів та законодавства, пов'язані із безпекою даних і оподаткуванням, можуть ускладнити вихід на міжнародні ринки. Компанії повинні бути готовими адаптувати свої стратегії відповідно до законодавчих вимог кожної з країн, в межах якої планують здійснювати свою діяльність.

Культурні відмінності та різниця у споживчих звичках також можуть стати перешкодою для успішного розвитку електронної комерції. Підходи, які добре працюють на одному ринку, можуть не мати бажаних результатів на іншому через відмінність у вподобаннях споживачів. Тому важливо проводити постійне дослідження ринку та адаптувати маркетингові стратегії, щоб врахувати культурні особливості представників кожної країни.

Не слід залишати поза увагою те, що глобальна економіка є динамічною,

і зміни в економічних умовах можуть значно впливати на попит на товари та послуги. Коливання курсів валют також може вплинути на прибутковість міжнародних угод, тож компанії повинні бути готовими до цих викликів і розробляти плани на випадок економічних криз.

Бачення шляхів боротьби з ризиками є однією з найважливіших складових успіху компаній на ринку електронної комерції.

## **Стратегії пом'якшення ризиків електронної комерції**

З метою запобігання кіберзагрозам компаніям слід впроваджувати сучасні технології захисту даних. Регулярні аудити безпеки, підвищення відповідної кваліфікації персоналу і використання поглибленої аналітики для виявлення загроз можуть суттєво знизити ризики. Також важливо мати план реагування на будь-які інциденти, щоб швидко відбити можливі кібератаки.

Співпраця з місцевими юристами і експертами з міжнародного права може допомогти компаніям уникнути пасток, пов'язаних із законодавством. Адаптація до місцевих норм і стандартів дозволить зменшити ризики зіткнення з правовими проблемами.

Дослідження локальних ринків є важливим етапом у здійсненні електронної комерції. Компанії повинні враховувати культурні, соціальні та економічні відмінності, щоб адаптувати свої продукти і маркетингові стратегії до специфіки кожного ринку. Диверсифікація ринків і продуктів може зменшити ризики, пов'язані з коливаннями попиту. Застосування різних фінансових інструментів дозволить компаніям краще управляти фінансовими ризиками, які виникають на глобальному ринку.

## **Висновки**

Електронна комерція є важливим інструментом глобалізації, який дозволяє малим і середнім підприємствам легко виходити на міжнародні ринки. Вона знижує бар'єри для входу, сприяє зростанню обсягів продажів і прибутковості. Однак разом із можливостями електронна комерція несе ризики, зокрема, загрози кібербезпеки, які вимагають інвестицій у захисні системи.

Правові виклики та культурні відмінності є серйозними перешкодами для міжнародної електронної комерції. Компаніям потрібно адаптуватися до місцевих законів і культурних особливостей, щоб досягти успіху. Крім того, електронна комерція сприяє інноваціям у бізнесі, стимулюючи появу нових моделей, таких як дропшипінг.

Електронна комерція залишається ключовим фактором глобалізації, але для успішного використання її можливостей необхідно враховувати ризики і розробляти стратегії їх подолання. Майбутні дослідження можуть зосередитися на кількісному аналізі впливу електронної комерції на фінансові показники компаній.

## Посилання

- Березовська, Л., & Кириченко, А. (2022). Розвиток електронної комерції в Україні та ЄС. *Економіка Та Суспільство*, 42. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-42-15>
- Воробйова, В., & Чернявська, Т. (2023). Вплив штучного інтелекту на торгівлю: можливості та виклики для українського ринку. *Challenges and Issues of Modern Science*, 1, 374-378. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/71>
- Тримбовецький, І. (2021). Дропшипінг: переваги та недоліки. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2021)*. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/viewFile/11210/9344>
- Alibaba. (2024). Alibaba official website. <https://www.alibaba.com>
- Amazon. (2024). Amazon official website. <https://www.amazon.com>
- CompuServe. (2024). CompuServe official website. <https://www.compuserve.com>
- eBay. (2024). eBay official website. <https://by.ebay.com>
- Krupskiy, O. P., Vorobiova, V., & Stasiuk, Y. (2023). Prospects of using GPT chat in marketing. *Time description of economic reforms*, (3), 89-97. <https://doi.org/10.32620/cher.2023.3.11>
- Makedon, V., Krasnikova, N., Krupskiy, A., Stasiuk, Y. (2022). Arrangement of digital leadership strategy by corporate structures: a review. *Economic Studies*, 31(8), 19-40. [https://www.iki.bas.bg/Journals/EconomicStudies/2022/2022-8/02\\_Nataliya-Krasnikova.pdf](https://www.iki.bas.bg/Journals/EconomicStudies/2022/2022-8/02_Nataliya-Krasnikova.pdf)
- PayPal. (2024). PayPal official website. <https://www.paypal.com/ua/home>
- Phillips, S. (2020). Working through the pandemic: Accelerating the transition to remote working. *Business Information Review*, 37(3), 129-134. <https://doi.org/10.1177/0266382120953087>
- Shyshkina, O. (2023). Globalization and its impact on the functioning and development of foreign exchange markets. *Problems and Prospects of Economics and Management*, 4(36), 249-266. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-4\(36\)-249-266](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-4(36)-249-266)
- UNCITRAL. (1999). *Model law on electronic commerce with guide to enactment 1996 with additional article 5 bis as adopted in 1998*. United Nations Commission on International Trade Law. [https://digitallibrary.un.org/record/286739/files/19-04970\\_ebook.pdf](https://digitallibrary.un.org/record/286739/files/19-04970_ebook.pdf)
- Vivek, R., Nanthagopan, Y., Piriyyatharshan, S., & Krupskiy, O. P. (2023). Teaching Practices in the New Normal: Qualitative Inquiry (Sri Lanka Case). *Advanced Education*, 11(23), 170-189. <https://doi.org/10.20535/2410-8286.290370>
- Vorobiova, V., Krupskiy, O., & Stasiuk, Y. (2023). The Role of Digital Technologies in Modern Trade: a Study of Global Trends and Prospects for Ukraine. *Economic Journal Odessa Polytechnic University*, 2(24), 44-55. <https://doi.org/10.15276/ej.02.2023.5>
- Yeganeh, H. (2021). Emerging social and business trends associated with the Covid-19 pandemic. *Critical perspectives on international business*, 17(2), 188-209. <https://doi.org/10.1108/cpoib-05-2020-0066>

# Аналіз умов відкриття малого бізнесу в індустрії краси: приклад міста Дніпро

Яніна Колодкіна , Олександр Крупський 

**Purpose.** The aim of this article is to provide an in-depth analysis of the conditions necessary for launching and developing a small business within the beauty industry in the city of Dnipro. Specifically, it examines how the utilization of a small knowledge base, combined with thorough environmental analysis, can be leveraged to open a successful beauty salon. The research also aims to identify and address the range of challenges that entrepreneurs may face when establishing such businesses in the local context. **Design / Method / Approach.** The study employs a qualitative methodology, rooted in an extensive review of existing literature on leadership, project management, and small business development. Through the synthesis of theoretical frameworks and practical business insights, the article offers a structured approach to understanding the key steps involved in the creation of a beauty salon. **Findings.** The findings suggest that a systematic environmental analysis, alongside careful planning and risk assessment, significantly enhances the likelihood of business success. The study highlights that proper preparation at the planning stage mitigates many common obstacles faced by small business owners. **Theoretical Implications.** This study enhances the understanding of starting a small business in Dnipro's beauty sector, providing a framework for effective project implementation. **Practical Implications.** The study offers actionable recommendations for the successful establishment of beauty salons. It emphasizes the importance of developing comprehensive business plans, investing in essential training programs, particularly in the areas of emotional intelligence, communication, and adaptability. **Originality/Value.** The originality of this study lies in its thorough analysis of opening a beauty salon in Dnipro. It offers both academic and practical insights for business initiation. **Research Limitations / Future Research.** While the research focuses on qualitative analysis within a specific industry and city, future studies could expand the role of online platforms and social media in the development of small businesses within the beauty industry. **Paper Type.** Practitioner paper.

## Keywords:

small business development, beauty industry, Dnipro, environmental analysis, business planning, entrepreneurship challenges, risk assessment, market trends

## Contributor Details:

Yanina Kolodkina, Undergraduate Student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, kolodkina.ya@365.dnu.edu.ua

Oleksandr P. Krupskyyi, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, krupskyy71@gmail.com

Процес створення салону краси вимагає врахування ряду ключових аспектів, таких як аналіз ринку, вибір місця розташування, фінансове планування та забезпечення високого рівня обслуговування клієнтів. Важливим елементом є підприємницький досвід засновника, який визначає успішність розвитку бізнесу (Canco, 2022).

Салони краси відіграють важливу роль у споживацькій культурі, але також можуть становити ризики для здоров'я. Сфера послуг салонів краси складається з трьох ключових вимірів: змістовний, комунікативний та соціальний (Kamrani and Jhamb, 2020). Однак ці заклади можуть бути джерелами передачі хвороби, поширюючи вірусні, грибкові та бактеріальні інфекції через інструменти та продукти (Alharbi and Alhashim, 2021). Якість повітря в салонах викликає занепокоєння, оскільки концентрація PM10 у приміщенні часто перевищує рекомендовані норми і потенційно наражає персонал і клієнтів на вплив різних забруднювачів, що переносяться повітрям (Evyugina et al., 2021). Незважаючи на ці ризики, салони краси досягли культового статусу в суспільстві завдяки чотирьом важливим вимірам: просторові перформанси, посередництво гендерної близькості, наративи магічних перетворень і твердження про медико-наукові істини (Ourahmoune and El Jurdi, 2020). Крім того існують дослідження в яких наголошення на підвищення якості життя людей які регулярно відвідують салони краси (Возняк and Святенко, 2009; Ziehfrend et al., 2024). Розуміння цих аспектів має вирішальне значення для керівників салонів, щоб покращити досвід клієнтів, зберігаючи при цьому належні стандарти охорони здоров'я та безпеки. Останнє десятиріччя ринок салонів краси в Україні є одним з найдинамічніших і конкурентоспроможних (Olifigenko and Loseva, 2018). Щороку відкриваються нові салони, а вже існуючі салони постійно вдосконалюються, щоб задовольнити потреби клієнтів.

## Мета та завдання дослідження

Метою цього дослідження є аналіз умов для відкриття та розвитку малого бізнесу в індустрії краси на прикладі міста Дніпро. Дослідження спрямоване на визначення ключових чинників успішного створення салону краси, зокрема застосування знань і проведення зовнішнього бізнес-середовища, яке впливає на функціонування підприємства для мінімізації ризиків і підвищення ефективності бізнесу.

Для досягнення мети було визначено такі завдання:

- Провести аналіз ринкового середовища індустрії краси в місті Дніпро для визначення основних тенденцій та вимог.
- Оцінити ключові проблеми, з якими можуть зіткнутися підприємці під час відкриття салону краси.
- Визначити теоретичні аспекти та практичні інструменти, що сприяють успішній реалізації бізнес-проектів у сфері краси.
- Визначити можливості для подальшого розвитку індустрії краси в контексті малого бізнесу в Україні.

## Методологія дослідження

Дослідження реалізувалося за допомогою якісного методу, що дозволив глибоко проаналізувати умови та виклики, пов'язані з відкриттям малого бізнесу в індустрії краси в місті Дніпро. Основним джерелом даних був всебічний літературний огляд наукових статей, що стосуються розвитку малого бізнесу, проектного менеджменту та лідерства. Методологія передбачала синтез теоретичних рамок і практичних бізнес-інсайтів для формування структурованого підходу до розуміння ключових етапів створення салону краси. Це дослідження сприятиме кращому розумінню умов започаткування бізнесу в індустрії краси, пропонуючи практичні рекомендації для підприємців.

## Видозмінення ринку салонів краси та нові формати надання послуг

За даними Kyivstar Business Hub, у 2024 році в Україні налічувалося близько 60 тисяч салонів краси, і цей показник постійно зростає (Звягінцева, 2024). Тому для успішного запуску салону краси в Україні необхідно враховувати ряд особливостей цього ринку. Україна не виняток, індустрія краси стрімко розвивається, впроваджуються цікаві інноваційні технології, з'являються нові послуги. Косметична продукція є одним з індикаторів ринку краси.

Про динамічність світового ринку косметичної продукції свідчать зростаючі обсяги продажів. Обсяг світового ринку косметики оцінювався в 295,95 мільярда доларів США в 2023 році, і очікується, що він буде зростати на 6,1% з 2024 по 2030 рік. Одним із основних факторів, що сприяють розширенню ринку, є зростаюча обізнаність споживачів щодо покращення свого зовнішнього вигляду. Крім того, впровадження косметики з натуральними, нетоксичними та органічними інгредієнтами ще більше сприяло розширенню ринку (Grand View Research, 2024). В Україні і в країнах СНД середньостатистичні відвідувачі салонів краси в основному жінки у віці від 25 до 35 років, вони становлять близько 75-80%.

Ринок послуг салонів краси, в 2018-2021 роках істотно видозмінився. З'явився попит на монопослуги. Якщо раніше віддавали перевагу комплексному догляду, роблячи всі процедури в одному салоні, то зараз в тренді монопослуги. Манікюр роблять в одному місці, стрижку в іншому, а фарбування в третьому.

З новим трендом в індустрії краси утворюються і нові формати надання послуг:

- Експрес-формати, які передбачають роботу без запису. Наприклад, манікюрні стійки в торгових центрах, часто за нижчими цінами, ніж в традиційних салонах.

- Моностудії, що спеціалізуються на одній послугі, або, наприклад, студії, де можна зробити тільки оформлення брів або ж тільки лазерну епіляцію.

- Салони для конкретної категорії людей. Наприклад, дитячі перукарні

або барбершопи - перукарні виключно для чоловіків, в деякому роді чоловічі клуби.

- Салони і студії економ і лоукост-форматів. Салони, в яких немає, адміністратора, і де не запропонують чай або каву.

Нікуди не поділися і приватні майстри. Попит на них виріс, що також впливає на ринок послуг в сфері краси. Багато майстрів, які працюють самостійно, поєднують приватну практику з роботою в дорогих салонах краси.

## **Проектування та відкриття салону краси в теорії**

Проектування та відкриття салону краси є формою бізнесу, що передбачає надання різноманітних послуг з догляду, таких як макіяж, манікюр і педикюр, масажі, фарбування вій та брів, стрижка та інші процедури. Ці послуги становлять невід'ємну частину сучасного життя. Хоча деякі з них можна виконувати вдома безкоштовно, проте їх виконання кваліфікованим майстром у салоні забезпечує значно вищу якість та результат. Перевагою салону краси для споживачів є можливість отримати кілька процедур в одному місці. Наприклад, клієнт може спочатку зробити покриття гель-лаком на руках і ногах, а потім перейти до стрижки та укладки волосся. Таким чином, розглянемо основні етапи створення салону краси з нуля, зосереджуючись на ключових аспектах, які сприятимуть успішному функціонуванню цього бізнесу.

Для започаткування нового бізнесу необхідно спочатку чітко визначити сутність бізнес-плану. Бізнес-план є стратегічним документом, що надає розгорнуту характеристику планованих операцій і містить економічне обґрунтування проекту. Він забезпечує можливість оцінки ефективності запланованих заходів, відповідає на питання щодо доцільності інвестицій та дозволяє прогнозувати розвиток бізнесу в умовах ринкових змін (Височин, 2023). Створення бізнес-плану включає аналіз ринкових тенденцій, оцінку конкурентів, визначення сильних і слабких сторін їхньої діяльності, прогнозування витрат на запуск бізнесу, а також ідентифікацію потенційних ризиків та загроз (Samczuk, 2024).

## **Поетапний аналіз процесу проектування**

Першим етапом бізнес плану має бути аналіз ринку та аудиторії. Основними споживачами будуть люди вікової категорії від 17 до 50 років. Місто Дніпро характеризується значною соціально-економічною різноманітністю населення, де поряд із сім'ями з обмеженим доходом проживають і заможні громадяни. В основному найпопулярнішими процедурами є:

1. манікюр/педикюр;
2. фарбування/стрижка волосся;
3. корекція брів;
4. епіляція.

Для успішного запуску салону краси на початковому етапі буде достатньо запропонувати ці чотири послуги. Важливо не намагатися охопити всі



види послуг одразу; згодом можна розширити асортимент, включивши, наприклад, масаж, ламінування брів та інші процедури.

Другим етапом процесу відкриття салону краси є вибір оптимального місцерозташування. Найбільш перспективними зонами для цього є спальні райони міста, де проживає значна кількість потенційних споживачів послуг. При виборі приміщення важливо враховувати специфіку кожного району, оскільки в Дніпрі існує велика різноманітність спальних районів, що відрізняються як за географічним положенням, так і за рівнем розвитку інфраструктури, соціально-економічним статусом мешканців та їх доходами.

Якщо власники нового проекту вирішать орендувати приміщення в менш центральній частині міста, їм слід усвідомлювати, що основна частина населення в цих районах представлена середнім класом, що може обмежити споживчий попит на послуги з високою вартістю. У разі вибору престижного району, клієнти матимуть підвищені вимоги до якості обслуговування, інтер'єру приміщення, сервісу та інших аспектів. Відкриття салону в дорогому районі є складним завданням, оскільки це вимагає значних інвестицій у підтримку відповідного рівня обслуговування. Оптимальним варіантом є вибір середнього за статками району, що дозволить залучити різноманітну клієнтську базу, включаючи як осіб з обмеженими фінансовими можливостями, так і більш забезпечених споживачів.

Також важливо обрати яке приміщення орендувати. Зручним варіантом буде невелика квартира на 1 поверсі зі своїм виходом на вулицю та багатьма маленькими кімнатами всередині. Важливим для майстрів є свій кабінет, так набагато легше концентруватися та працювати за своїм клієнтом. Варіант розміщення всіх майстрів в одному великому приміщенні є менш ефективним. Це буде незручним для самих майстрів, оскільки обрізане волосся може змішуватися з пилом від гель-лаку, що створить безлад на робочих поверхнях, таких як масажний столик. Крім того, клієнти також відчуватимуть дискомфорт у такій обстановці. Якщо не буде можливості орендувати таке готове приміщення, то слід самостійно зробити окремі кімнати, але обов'язково напочатку перед орендою узгодити це з власником квартири.

Наступним, третім етапом є проведення ремонту та закупівля обладнання, що є найвитратнішою частиною проекту. Планування приміщення слід організувати з урахуванням функціональних зон, розподіливши площу таким чином: рецепція, зона відпочинку та гардероб – 10 %, перукарський зал – 35 %, кабінет манікюру та педикюру – 15 %, кабінет косметолога – 10 %, кабінет візажиста – 5 %, кабінет масажу – 20 %, туалет – 5 %. Як було зазначено раніше, варто починати діяльність салону з основних чотирьох процедур, а в подальшому розширювати спектр послуг. Водночас доцільно облаштувати приміщення з урахуванням можливості надання додаткових послуг, таких як масаж та епіляція.

Косметичний ремонт рекомендується виконувати в нижніх і заспокійливих кольорах, щоб створити атмосферу, що сприяє розслабленню клієнтів під час процедури. Важливим аспектом є оформлення вивіски та входу до салону: основна вивіска повинна бути привабливою і містити назву закладу, а біля дверей — невелика вивіска з описом послуг, що пропонуються. Це

допоможе забезпечити чітке сприйняття інформації потенційними клієнтами та підкреслить професійний імідж закладу.

Четвертим етапом підготування є підбір персоналу. До цього питання слід відноситися дуже уважно оскільки прибуток салону залежить на 80 % від майстрів. Слід підбирати спеціалістів, які вже мають досвід роботи з людьми. Якщо для початку салону брати 4 типи процедур (стрижка, манікюр/педикюр, косметолог та візаж), то слід взяти на роботу трьох чи чотирьох перукарів, трьох майстрів манікюру/педикюру, двох косметологів та одного візажиста. Необхідно також найняти двох адміністраторів, які відповідатимуть за запис клієнтів, контроль графіків та інші організаційні питання. Крім того, салону потрібен бухгалтер, який займатиметься виплатою заробітної плати майстрам та контролем фінансових операцій. Також потрібна одна чи дві прибиральниці, які кожен день будуть наводити порядок в салоні. Для всіх робітників потрібно скласти таблицю з заробітною платою щоб розуміти яка кількість коштів буде йти на їх утримання (табл. 1).

**Таблиця 1 – Витрати на заробітну плату штатних працівників**  
(Джерело: Кононопський, 2024)

Посада	Кількість штатних одиниць	Витрати на оплату праці, включаючи податки та страхові внески, грн
Адміністратор	2	38 000
Перукар	4	64 000
Майстер манікюру та педикюру	3	48 000
Косметолог	2	40 000
Візажист	1	14 000
Прибиральниця	2	8 000
Бухгалтер	1	18 000
Загальна сума витрат		230 000

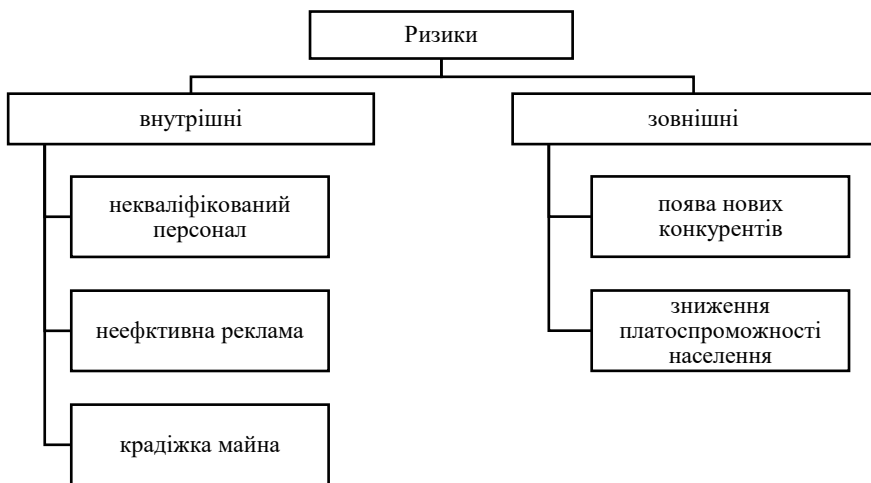
Закупівля обладнання є суттєво витратною процедурою, оскільки необхідно придбати стільці, столи, кушетки, дивани, дзеркала, а також матеріали для проведення різних процедур і багато іншого для роботи майстрів. На початковому етапі важливо ретельно спланувати, скільки обладнання та інструментів буде потрібно. Кожен співробітник повинен мати власне робоче місце, оскільки використання чужого робочого простору є негігієнічним і незручним.

Обладнання повинно відповідати високим стандартам якості, а також забезпечувати належний рівень стерилізації. Регулярна обробка приміщень є необхідною умовою, оскільки можуть траплятися різні ситуації, зокрема звернення клієнтів з недостатньою особистою гігієною. Це допоможе підтримувати високий рівень санітарії та безпеки в салоні.

П'ятим етапом є юридичне оформлення бізнесу, включаючи його реєстрацію в державному реєстрі та отримання необхідних дозволів. Для реєстрації бізнесу потрібно подати заявку, яка підтверджує дотримання всіх законодавчих норм, що регулюють відкриття такого роду діяльності. У разі

планування надання послуг масажу чи епіляції, також необхідно отримати медичну ліцензію. Важливими аспектами є вибір назви салону краси та отримання коду ЄДРПОУ. Назва повинна бути унікальною та не схожою на вже зареєстровані в Україні. Код ЄДРПОУ присвоюється державою автоматично після реєстрації юридичної особи. Наступним кроком є вибір виду діяльності та КВЕД. Зазвичай фізичні особи-підприємці, що надають перукарські послуги, обирають першу або другу групу єдиного податку. У першому випадку послуги надаються безпосередньо підприємцем, а в другому — з можливістю залучення працівників. Основний КВЕД для салонів краси — 96.02, що охоплює надання послуг перукарнями та салонами краси (Державна податкова служба України, 2024). Після цього необхідно отримати дозвіл від санітарно-епідеміологічної станції, подавши відповідну заяву та пакет документів. Виконавши всі ці процедури, салон краси буде офіційно зареєстровано.

Шостий етап полягає у визначенні потенційних ризиків для салону краси. Ризики поділяються на внутрішні та зовнішні, кожен із яких має свої особливості та фактори впливу (рис. 1).



**Рисунок 1 – Ризики для салону краси (Джерело: Конотопський, 2024)**

Останнім важливим аспектом є рекламна кампанія, яку доцільно розпочати ще до відкриття салону, щоб забезпечити наявність клієнтів вже в перший день роботи. Найпростішим і найбільш ефективним варіантом є он-лайн-реклама. Використання соціальних мереж, таких як Instagram, Facebook і Twitter, дозволяє створювати рекламні пости, які з'являтимуться у стрічках новин потенційних клієнтів, інформуючи їх про відкриття нового салону. Додатково для підвищення зацікавленості можна організувати майстер-класи з виконання певних процедур, залучаючи як клієнтів, так і майстрів-початківців для навчання.

Крім онлайн-реклами, варто розглянути можливість рекламування у друкованих виданнях, таких як журнали, де можна детально описати послуги салону, представити прайс-лист та додати фотографії. Для залучення нових клієнтів також доцільно пропонувати знижки на процедури на честь відкриття. Це стимулює перший візит, і якщо клієнтам сподобається сервіс, вони з більшою ймовірністю стануть постійними відвідувачами.

Отже, проаналізувавши модель відкриття салону краси, можна дійти висновку, що цей процес є значно складнішим, ніж може здаватися на перший погляд. Салон краси відноситься до категорії малого бізнесу, який потребує значної уваги як на етапі запуску, так і впродовж усього періоду функціонування. Прибутковість цього підприємства можлива лише за умови значних фінансових інвестицій, що можуть сягати кількох тисяч гривень, а також завдяки наполегливій праці як власника, так і персоналу салону. Проте, при ретельному підході до розробки бізнес-плану, залученні коштів на обладнання, інтер'єр, рекламну кампанію та забезпеченні персоналу необхідними матеріалами, цей малий бізнес має потенціал стати рентабельним і швидко окупити початкові інвестиції.

## **Висновки**

У роботі акцентовано увагу на важливості комплексного підходу до запуску бізнесу, починаючи з проведення ґрунтового дослідження ринку. Зазначається, що ринок салонів краси в Україні є динамічним і висококонкурентним, а споживачі все більше віддають перевагу професійним послугам та інноваційним форматам, таким як моностудії та експрес-формати. Український ринок постійно адаптується до нових тенденцій, зберігаючи високий попит на монопослуги, такі як стрижки, манікюр та фарбування.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що одним із ключових факторів успішного відкриття салону є наявність чіткого та детального бізнес-плану. В науковій роботі розглянуто основні етапи цього процесу: аналіз конкурентного середовища, визначення цільової аудиторії, вибір оптимального місця розташування та оцінка вартості ремонту й закупівлі обладнання. Особливо важливим є правильний вибір локації, з урахуванням демографічних і соціальних характеристик різних районів міста Дніпро, оскільки це суттєво впливає на успішність бізнесу.

Важливим аспектом є підбір кваліфікованого персоналу, адже успіх салону значною мірою залежить від професіоналізму майстрів і рівня їх взаємодії з клієнтами. Рекомендується залучати досвідчених фахівців на основні позиції, зокрема перукарів, майстрів манікюру, педикюру, косметологів та візажистів. Також велике значення має якість обладнання та дотримання санітарно-гігієнічних норм, що є критичними для забезпечення здоров'я та безпеки клієнтів.

Окремий розділ роботи присвячено аналізу ризиків, пов'язаних із відкриттям малого бізнесу, на прикладі салону краси в місті Дніпро. Виявлення потенційних ризиків на початкових етапах дозволяє підготуватися до можливих викликів і мінімізувати негативний вплив. Таким чином, відкриття

салону краси в Дніпрі потребує ретельного прорахунку всіх ризиків, оцінки витрат та належної підготовки для успішної реалізації проекту.

## Посилання

- Возняк, І. Я., & Святенко, Т. В. (2009). Вивчення якості життя у пацієнтів з псоріатичною хворобою. *Дерматовенерологія. Косметологія. Сексопатологія*, 1, 273-275. [https://repo.dma.dp.ua/2054/1/37\\_Svyaten\\_27.pdf](https://repo.dma.dp.ua/2054/1/37_Svyaten_27.pdf)
- Державна податкова служба України. (2024). *ФОП і перукарські послуги*. Державна податкова служба України. <https://lv.tax.gov.ua/media-ark/news-ark/401480.html>
- Звягінцева О. (2024). *Як залучити більше клієнтів у салон краси: 7 рекламних інструментів*. Kyivstar Business Hub. <https://hub.kyivstar.ua/articles/yak-znajty-novyh-kliyentiv-u-salonu-krasy-ta-zbilshyty-prodazhi>
- Конотопський, А. (2024). *Готовий бізнес-план салону краси з нуля з розрахунками, презентація та основні етапи роботи*. ITстатті.in.ua. <https://itstatti.in.ua/18-biznes/657-biznes-plan-salonu-krasi.html>
- Alharbi, N. M., & Alhashim, H. M. (2021). Beauty Salons are Key Potential Sources of Disease Spread. *Infection and Drug Resistance*, 14, 1247–1253. <https://doi.org/10.2147/idr.s303461>
- Canco, I. (2022). What Made Me an Entrepreneur?. *European Journal of Management Issues*, 30(3), 153-164. <https://doi.org/10.15421/192214>
- Evtuygina, M., Vicente, E. D., Vicente, A. M., Nunes, T., Lucarelli, F., Calzolari, G., Nava, S., Blanco-Alegre, C., Calvo, A. I., Castro, A., Fraile, R., Oduber, F., Cerqueira, M., & Alves, C. A. (2021). Air quality and particulate matter speciation in a beauty salon and surrounding outdoor environment: Exploratory study. *Atmospheric Pollution Research*, 12(11), 101174. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101174>
- Grand View Research. (2024). *Cosmetics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Skin Care, Hair Care), By End-user (Men, Women), By Distribution Channel (Offline, Online), By Region (North America, Europe), And Segment Forecasts, 2024 – 2030*. Grand View Research. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cosmetics-market>
- Kampani, N., & Jhamb, D. (2020). Uncovering the dimensions of servicescape using mixed method approach – A study of beauty salons. *Benchmarking: An International Journal*, 28(4), 1247–1272. <https://doi.org/10.1108/bij-09-2020-0492>
- Olifirenko, L., & Loseva, O. (2018). Quality management of services as development level indicator on the beauty industry enterprises in Ukraine. *Public administration: scientific research and development*, (2), 26-35. <https://pa.stu.cn.ua/tmppdf/115.pdf>
- Ourahmoune, N., & Jurdi, H. E. (2020). Beauty salon- a marketplace icon. *Consumption Markets & Culture*, 24(6), 611–619. <https://doi.org/10.1080/10253866.2020.1741356>
- Samczuk, F. (2024). *Complete guide: write your own company's business plan step by step*. Well Done Business. <https://welldonebusiness.com/en/blog/complete-guide-write-your-own-business-plan-step-by-step>
- Ziehfreund, S., Wecker, H., Mittag, S., Weis, J., Tizek, L., Verkhoturova, V., Legat, F. J., Weger, W., Großschädl, K., Cerpes, U., Sadoghi, B., Riegler, M., Balato, A., Di Brizzi, E. V., Buononato, D., Babino, G., Calzavara - Pinton, P., Rossi, M. T., Rovaris, S., . . . Zink, A. (2024). Happiness across the borders—A cross - sectional study among patients with psoriasis and atopic dermatitis in Europe. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology. Portico*. <https://doi.org/10.1111/jdv.20288>

# Багатоцільова оптимізація рішень щодо аутсорсингу на віртуальному підприємстві

Тетяна Гринько , Сергій Дулепов 

**Purpose.** The purpose of the study is to develop a model of multi-objective optimization of outsourcing at virtual enterprises, the main purpose of which is to respond quickly to market changes and maximize the efficiency of the use of enterprise resources. **Design / Method / Approach.** The theoretical basis of the work was made up of the works of scientists dedicated to the functioning of the virtual economy and virtual enterprises, the peculiarities of personnel outsourcing in the modern conditions of the functioning of enterprises and the optimization of the resource potential of the enterprise. During the research, methods of theoretical analysis and synthesis, modeling, generalization and systematization of scientific information were used. **Findings.** The peculiarities of the functioning of the virtual enterprise made it possible to substantiate the expediency of the introduction of outsourcing at the virtual enterprise, the use of which allows to reduce risks in the implementation of the principles of virtual organizations. **Theoretical Implications.** The obtained results are consistent with the principles of strategic management of enterprises in modern conditions of globalization and digital transformation of society, an important aspect of which is the effective use of limited resources, which determines a successful enterprise management strategy. **Practical Implications.** The constructed model of multi-objective optimization of the use of outsourcing in a virtual enterprise allows to conduct an economic justification of the effectiveness of the decisions made on the implementation of outsourcing, to calculate possible risks and the effectiveness of project implementation. **Originality / Value.** The use of outsourcing is one of the tools for effective implementation of virtual enterprise business models. This is the direction of realizing the potential of Ukraine's economy against the background of the ongoing Russian invasion. **Research Limitations / Future Research.** Further research includes verification of the model, comparative analysis of cases of its implementation, expansion of the list of evaluation criteria, and research into possible synergistic effects from the implementation of outsourcing implementation projects. **Paper Type.** Empirical.

## Keywords:

virtual enterprise, outsourcing, multi-objective optimization, integral criterion

## Contributor Details:

Tetiana Grynko, Dr.Sc., Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, greisy25@gmail.com

Serhii Dulepov, Postgraduate, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, dulepov1926@gmail.com

Традиційна організація управління підприємством ґрунтується на принципах поділу та спеціалізації праці, які у сучасних умовах не завжди залишаються ефективними, що, разом із досягненнями в галузі інформаційних технологій, зумовлюють появу нових форм ведення бізнесу.

Однією з подібних форм є віртуальні підприємства, активний розвиток яких спостерігається за кордоном та в Україні. При цьому основною метою віртуальних підприємств є оперативне реагування на ринкові зміни та максимізація ефективності використання ресурсів підприємств (Андрушкевич & Григорян, 2024).

Крім того, сучасна динаміка соціально-економічного розвитку характеризується кризовими явищами в економіці, соціальними та політичними суперечностями, що актуалізує задачі формування й ефективного використання ресурсного потенціалу з урахуванням фактору обмеженості (Жмуденко & Лішук, 2021).

Наразі критичним фактором, що визначає умови діяльності вітчизняних підприємств є повномасштабна війна, в умовах якої одним з дієвих шляхів мінімізації витрат є застосування аутсорсингу (Ачкасова, 2023), не втрачаючи при цьому конкурентних переваг за рахунок забезпечення умов збереження (підвищення) ефективності діяльності підприємства.

Тому оптимізацію процесів аутсорсингу персоналу на віртуальному підприємстві слід вважати актуальною задачею у процесі виробництва чи надання послуг віртуальними підприємствами.

## **Мета та завдання**

Метою даного дослідження є розробка моделі багатоцільової оптимізації аутсорсингу на віртуальному підприємстві. Її реалізація передбачає: окреслення особливостей функціонування віртуального підприємства, що зумовлюють застосування аутсорсингу; визначення критеріїв оптимізації аутсорсингу; побудову та аналіз узагальненої моделі.

## **Матеріали та методи**

Теоретичне підґрунтя роботи склали праці, присвячені функціонуванню віртуальної економіки та віртуальних підприємств (Андрушкевич & Григорян, 2024; Миронов, 2024), особливостям аутсорсингу в сучасних умовах (Ачкасова, 2023; Лютак та ін., 2024) і оптимізації ресурсного потенціалу підприємства (Жмуденко & Лішук, 2021; Guo & Zhang, 2022). В дослідженні застосовувалися методи теоретичного аналізу та синтезу, моделювання, узагальнення та систематизації наукової інформації.

## **Результати**

Зміни, спровоковані впливом інформаційно-комунікаційних технологій, проявляються через віртуалізацію господарських об'єктів (Миронов, 2024).

При цьому під терміном «віртуальне підприємство» слід розуміти динамічну та відкриту бізнес-систему, яка ґрунтується на створенні юридично незалежних підприємств, об'єднаних в єдиному інформаційному просторі з метою спільного використання своїх технологічних ресурсів для виконання всіх етапів робіт при реалізації спільного проекту. Серед основних переваг віртуальних підприємств можна виділити: можливість швидкого освоєння нових ринків, оптимізацію витрат, додаткові інвестиційні можливості, підвищення фінансового потенціалу, поліпшення майнового забезпечення, підвищення кваліфікації персоналу та розподіл ризиків між партнерами у віртуальних підприємствах. У цей же час недоліками віртуальних підприємств є: надмірна економічна залежність від партнерів, відсутність соціального захисту та матеріальної підтримки учасників, ризик ускладнення процесів (Андрушкевич & Григорян, 2024).

При цьому саме такі технології формують основу для розробки економічної, гнучкої організації процесів та асоціюються з такими явищами, як групова робота, мобільна та віддалена робота, аутсорсинг та інше (Шафорецько, 2023).

Аналітичні дослідження свідчать, що аутсорсинг має вагомо впливає на бізнес-середовище за рахунок, зокрема, глобалізації, прогресу технологій, розвитку інформаційних технологій, які формують нові можливості для вдосконалення бізнес-процесів та оптимізації витрат (Лютак та ін., 2024).

Так, однією з головних переваг, притаманних аутсорсингу є здатність охоплювати операції, які не є основними для фірми, що вдається до послуг аутсорсингу, що допомагає підприємствам, крім іншого, скоротити (оптимізувати) витрати (Ачкасова, 2023). Крім того, аутсорсинг дозволяє підприємствам покращити якість пропонованих продуктів або послуг, підвищити ефективність і якість обслуговування клієнтів (Лютак та ін., 2024).

Отже, для ефективного управління віртуальним підприємством потрібен оптимальний та оперативний розподіл завдань або серед учасників мережі, або з використанням аутсорсингу. У якості критеріїв оптимальності у цьому випадку доречно обрати: вартісні характеристики замовлення (критерій K1); характеристики якості виконання завдання (критерій K2).

Задача розподілу завдань за критерієм K1 може бути сформульована як «задача про призначення», яка у класичній постановці полягає у знаходженні пар «виконавець-робота», які мінімізують сумарні витрати на виконання всіх робіт, причому кожен виконавець виконує лише одну роботу, для однієї роботи потрібен лише один виконавець. Така задача є задачею комбінаторної оптимізації (задача про максимізацію або мінімізацію функції при заданих обмеженнях та при умові, що на деякі, або на усі, змінні накладена вимога цілочисельності) (Коломійцев та ін., 2023).

У цей же задача розподілу завдань за критерієм K2 може бути сформульована як задача знаходження пар «виконавець-робота», які максимізують якість виконання всіх робіт, при таких самих обмеженнях.

Отже, модель розподілу завдань складається з цільових функцій (1), (2) та системи обмежень (3), в яких:  $n$  – кількість виконавців;  $m$  – кількість завдань;  $c_{ij}$  – витрати (вартість) виконання  $j$ -го завдання  $i$ -м виконавцем;  $q_{ij}$  –



якість (компетентність) виконання  $j$ -го завдання  $i$ -м виконавцем;  $x_{ij}$  – факт виконання  $j$ -го замовлення  $i$ -м виконавцем (значення параметру дорівнює 1, якщо  $i$ -й виконавець виконує  $j$ -е замовлення, і дорівнює 0 – у зворотному випадку;  $F_1(X)$  – сумарне значення витрат на виконання завдань;  $F_2(X)$  – сумарне значення якості виконаних завдань.

$$F_1(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min ; \quad (1)$$

$$F_2(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij} x_{ij} \rightarrow \max . \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1, (i = \overline{1, n}); \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, (j = \overline{1, m}); \\ x_{ij} = (0; 1), (i = \overline{1, n}), (j = \overline{1, m}). \end{array} \right. \quad (3)$$

Система обмежень (3) відповідає ситуації  $n > m$  (кількість виконавців більше, ніж кількість завдань), що на практиці може бути забезпечено за рахунок сформованої бази потенційних суб'єктів аутсорсингу.

Слід відзначити, що оптимізаційна задача (1)-(3) є задачею з двома критеріями з різними напрямки оптимізації цільових функцій (1), (2) (витрати мінімізуються, якість максимізується).

Крім того, одиниці вимірювання витрат (вартості)  $c_{ij}$  та  $q_{ij}$  якості (компетентності) є різними. Зокрема, витрати можна виразити грошовими одиницями, а якість (компетентність) в бальній шкалі від 0 до 10 (більшому значенню відповідає більший рівень якості (компетентності)).

У цьому випадку інтегральна цільова функція  $F(X)$  може бути побудована у формі:

$$F(X) = \sum_{k=1}^2 \omega_k \frac{|F_k(X) - F_k^o|}{F_k^o} \rightarrow \min, \quad (4)$$

в якій  $k$  – порядковий номер критерію оцінки;  $\omega_k$  – ваговий коефіцієнт  $k$ -го критерія;  $F_k^o$  – нормуючий дільник.

Вагові коефіцієнти  $\omega_k$  відображають вплив відповідного критерію на загальний результат та визначаються декларативно або за результатами експертного аналізу. При цьому

$$\omega_k \in [0; 1], \sum_{k=1}^2 \omega_k = 1, \quad (5)$$

Нормуючий дільник може вводитись як найкраще (еталонне) значення за відповідним критерієм. Цільова функція (4) відображає відхилення від «еталону», загальна мінімізація якого при обмеженнях (3) й дозволяє визначити найкращий розподіл завдань між потенційними виконавцями.

## Висновки

Обґрунтовано доцільність впровадження аутсорсингу на віртуальному підприємстві, застосування якого дозволяє знизити ризики при реалізації принципів віртуальних організацій за рахунок оперативної перебудови власної структури та архітектуру процесів для забезпечення за рахунок

постачальників послуг підвищення рівня надійності, якості та ефективності в умовах динамічного ринку та мінливого бізнес-середовища. Запропоновано модель багатоцільової оптимізації дозволяє проводити економічне обґрунтування ефективності прийняттям рішення про впровадженням аутсорсингу, прорахувати можливі ризики та ефективність реалізації проекту. В умовах відсутності повної інформації щодо незалежних та автономних виконавців та їх можливостей застосування моделі передбачає проведення оцінку та відбору за тією інформацією, яку вони надають самі або за зовнішніми результатами та оцінками їх діяльності. Отримані результати узгоджуються з принципами стратегічного управління підприємствами в сучасних умовах глобалізації та цифрової трансформації суспільства (Grynko & Hvinishvili, 2024), важливим аспектом якого є ефективне використання обмежених ресурсів, що визначає успішну стратегію управління підприємством. Напрями подальших досліджень включають емпіричну верифікацію моделі, порівняльний аналіз кейсів її реалізації в різних контекстах бізнес-процесів, розширення переліку критеріїв оцінки та вивчення можливих синергетичних ефектів від реалізації проектів впровадження аутсорсингу на віртуальному підприємстві.

## Посилання

- Grynko, T., & Hvinishvili, T. (2024). Strategic Business Management in the Digital Economy. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 372-376. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/126>
- Guo, K., & Zhang, L. (2022). Multi-objective optimization for improved project management: Current status and future directions. *Automation in Construction*, 139, 104256. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104256>
- Андрушкевич, Н., & Григорян, Г. (2024). Технологія, переваги та ризики віртуального підприємства. *Економічний простір*, 189, 174-178. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/189-32>
- Ачкасова, О. (2023). Аутсорсинг персоналу в сучасних умовах функціонування підприємств. *Економіка та суспільство*, 49. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-49-22>
- Жмуденко, В. О., & Ліщук, Р. (2021). Оптимізація ресурсного потенціалу як стратегічний напрям розвитку підприємства. *Економічний простір*, 165, 70-75. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/165-12>
- Коломіїцев, О., Третяк, В., Калачова, В., Закіров, З., Полтавський, Е., Кудряшов, В., ... & Любченко, О. (2023). Інформаційна технологія використання гарантованих прогнозів під час рішення задач комбінаторної оптимізації. *Grail of Science*, (24), 302-312. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.02.2023.056>
- Лютак, О., Баула, О., & Татарчук, Д. (2024). Аутсорсинг в міжнародному бізнес-середовищі: перспективи та виклики. *Економічний простір*, 191. 275-279. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/191-45>
- Миронов, О. (2024). Теоретичні основи виникнення і функціонування віртуальної економіки. *Наукові інновації та передові технології*, 5(33). [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-5\(33\)-847-857](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-5(33)-847-857)
- Шафоренко, С. (2023). Сучасні тенденції рекрументу персоналу підприємств ІТ сфери в умовах цифровізації економіки. *Актуальні питання у сучасній науці*, 4(10). [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-4\(10\)-70-83](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-4(10)-70-83).

# Microplastics in agricultural soils: sources and microbial remediation approaches

Nataliia Tkachuk , Liubov Zelena , Yaroslav Novikov 

**Purpose.** The purpose of this study was theoretical analysis of the sources of microplastics in agricultural soils, its impact on agroecosystems and microbial remediation approaches to remove microplastics from the soil. **Design / Method / Approach.** Given the complex and multifaceted nature of the research topic, a complex of general scientific methods was used to achieve the research goal: analytical, synthetic, hermeneutic, pragmatic, generalization. **Findings.** The sources of microplastics in agricultural soils are plastics used to cover fertilizers, pesticides and seeds, film for mulching, use of wastewater for irrigation, sludge from wastewater treatment as fertilizers that can lead to the occurrence of environmental risks for the functioning of agroecosystems and human health. Microbial remediation is a promising direction for the removal of microplastics from agricultural soils. **Theoretical Implications.** Generalized information on the sources of microplastics in agricultural soils, the consequences for agroecosystems of this type of pollution, as well as microbial remediation approaches for the removal of microplastics are presented, which expands the understanding of microplastics as a pollutant of agroecosystems. **Practical Implications.** The given information will contribute to the growth of research into the level of contamination of agricultural soils with microplastics, in particular, in Ukraine, and the formation of biofilms of soil microorganisms-biodegraders on the surface of microplastics (with attention to sulfate-reducing bacteria), including influence of various toxicants on these processes. **Originality / Value.** The theoretical and practical issues of contamination of agricultural soils with microplastics are summarized with emphasis on biofilm formation as an important stage of microbial remediation. **Research Limitations / Future Research.** In Ukraine, the level of contamination of agricultural soils with microplastics, the impact of toxicants on the biofilm formation by soil microorganisms-biodegraders on the surface of microplastics (with attention to sulfate-reducing bacteria) have not been determined and further research on this issue is needed. **Paper Type.** Review.

## Keywords:

microplastics, agricultural soils, agroecosystems contamination, microbial remediation, biofilm formation

## Contributor Details:

Nataliia Tkachuk, Cand.Sc., Assoc.Prof., T. H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium": Chernihiv, UA, [n.tkachuk@chnpu.edu.ua](mailto:n.tkachuk@chnpu.edu.ua)

Liubov Zelena, Cand.Sc., Danylo Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, NAS of Ukraine: Kyiv, UA, [zelenalyubov@gmail.com](mailto:zelenalyubov@gmail.com)

Yaroslav Novikov, PhD Student, T. H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium": Chernihiv, UA, [silverghost@consultant.com](mailto:silverghost@consultant.com)



The problem of the accumulation of microplastics in the environment attracts the researchers' attention from various fields of knowledge and is relevant both for different countries of the world (Sa'adu & Farsang, 2023) and for Ukraine (Yurchenko et al., 2021; Fortuna & Borysovska, 2021). Microplastics consist of plastic particles less than 5 mm in size and is formed as a result of the action of physical, chemical and biological factors on plastic products used in everyday life and practical human activities (Duis & Coors, 2016). A significant amount of microplastics is found in various environments, including soil (Guo et al., 2020). Microplastics are a pollutant and pose a potential threat to human health (Ghosh et al., 2023). Microorganisms form biofilms on the surface of microplastics (Moyal et al., 2023; Tkachuk & Zelena, 2023; Rajcoomar et al., 2024; Tkachuk & Zelena, 2024) and contribute to its degradation, which is considered a promising approach to soil bioremediation (Nauendorf et al. al., 2016; Thapliyal et al., 2024).

The need to generalize the theoretical and practical issues of contamination of agricultural soils with microplastics with attention to the formation of biofilm as an important stage of microbial remediation determined the need for this study, that defined the sources of microplastics in agricultural soils, its impact on agroecosystems and microbial remediation approaches to remove microplastics from the soil.

## Methodology

Given the complex and multifaceted nature of the research topic, a complex of general scientific methods was used to achieve the research goal: analytical, synthetic, hermeneutic, pragmatic, generalization. The use of analytical and synthetic methods made it possible to determine the sources of contamination of agricultural soils with microplastics. The use of the hermeneutic method made it possible to analyze the impact of microplastics on the soil, in particular, the soil microbiota, the formation of biofilms for the process of microbial remediation. Conclusions, recommendations and proposals are based on practical generalization.

## Microplastics in agricultural soils

Plastics are used in agricultural production as a coating for fertilizers, pesticides (Rusyn et al., 2021) and for the seed coatings (Langlet et al., 2024). And although researchers note the high efficiency of this approach for crop production (Rusyn et al., 2021), the danger of the formation of microplastics in the soil is not taken into account. The contribution of coated fertilizers as sources of microplastics in agricultural soils was 3% (Sa'adu & Farsang, 2023). The issue of replacing artificial microplastics in seed coatings used in agriculture is under consideration (Langlet et al., 2024). The Center for International Environmental Law found that due to the use of microplastics to cover fertilizers, toxic pesticides become even more toxic when used in agriculture. This combination of chemicals negatively affects soil structure, climate, food quality, and ecological systems as a whole (Center..., 2022).

Another source of microplastics in agricultural soils is mulch film (Long et al., 2023). At the same time, it was shown that the most common microplastic was polyurethane, and polyethylene accounted for 2.7% of microplastics (Long et al., 2023).

A different source of pollution of agroecosystems by microplastics is their irrigation with wastewater, which contains a significant amount of these micro-particles (Ullah et al., 2021). The presence of microplastics in wastewater is noted by a number of authors (Habib et al., 2020; Ragoobur et al., 2021), the source of which, among other things, is hygiene products, in particular, wet wipes (Ó Briain et al., 2020; Lee et al., 2021). The use of sewage sludge as a biofertilizer for degraded soils (Marin & Rusănescu, 2023) is also a source of microplastic contamination of agricultural soils, as such sludge also contains microplastics (Arab et al., 2024). The contribution of sediment as a source of microplastics in agricultural soils was 16% (Sa'adu & Farsang, 2023).

In Europe, microplastics from biosolids (2.3–15.8 t/ha) tend to accumulate in the top 100 mm of agricultural soil (Ng et al., 2018). Accumulation of microplastics in soils deteriorates soil ecosystems, in particular, disrupts the composition of microbiota, which creates the necessary conditions for healthy plant growth, changes the concentration of chemical compounds, reduces the enzymatic activity of soils, affects water holding capacity, bulk density, texture, pH (Ullah et al., 2021). When consuming contaminated agricultural products, there is a threat of microplastics entering the human body (Ullah et al., 2021). The researchers noted that the calculated microplastic concentrations had a low non-carcinogenic and carcinogenic risk to the farming community (Sharmin et al., 2024). In addition, the colonization of the surface of microplastics by pathogenic microbiota due to fecal contamination (for example, from sewage or organic fertilizers and feces) is of concern as a route of transmission of human pathogens in the food chain (Quilliam et al., 2023). Soil microplastics, due to their significant sorption potential, can influence the degradation processes of pesticides and their level of toxicity (Bao et al., 2024). It was also shown that the accumulation of microplastics in the soil significantly promoted nitrous oxide, carbon dioxide and methane emissions, which is potentially dangerous for climate change (Chen et al., 2023).

In Ukraine, the level of contamination of agricultural soils with microplastics has not been determined, although all the sources of microplastics mentioned above have an impact on them, so there is a need for further research on this issue.

## **Microbial remediation as an approach to cleaning soils from microplastics**

There are several technologies for removing microplastics from the environment, and biological methods appear to be the most promising and environmentally friendly (Gao et al., 2022). Some groups of microorganisms are characterized by the ability to biodegrade microplastics and are promising agents for cleaning environments from it (Othman et al., 2021). Representatives of the genus *Bacillus* are actively researched as effective biodegraders of plastics (Tkachuk & Zelena,

2021). Microbial remediation is the use of microorganisms, in particular, in the form of biofilms, an eco-friendly technology for removing pollutants from various environments (Mani, 2020; Biswal & Malik, 2022). An important role in the formation of biofilm is played by glycoconjugates (glycoproteins and glycolipids) produced by microorganisms, with the participation of combinations of which disinfection of various types of pollutants is carried out - microbial glycobiotechnology (Bhatt et al., 2021).

Researchers have analyzed soil microbiota under the influence of various types of microplastics (Qian et al., 2018; Ren et al., 2020). However, microbial communities on microplastics are unique and are called microplastisphere/plastisphere (Zettler et al., 2013). Microplastics are considered as one type of soil pollutant (Guo et al., 2020), so special attention is paid to the bacterial diversity of biofilms on it. Thus, the dominance of *Proteobacteria* (37%), *Actinobacteriota* (33%), *Patescibacteria* (9%) microorganisms was established on the surface of polypropylene and polystyrene during exposure for 8 weeks in soil from an agricultural field (from a depth of 0-20 cm), which was cultivated using principles of ecological agriculture (Kublik et al., 2022). The dominance of *Methylophaga*, *Saccharimonadales*, *Sphingomonas* on the surface of microplastics of low-density polyethylene, polystyrene, polyethylene terephthalate (exposure of 15 and 30 days in non-mulched soil of greenhouses with a previous one-week cultivation) was revealed (Chen et al., 2022). Usually, microplastics change the number of bacterial communities by affecting their metabolism, but polyethylene and polypropylene in the form of microplastics did not affect the number or structure of soil microbes (Pang et al., 2023). However, there is evidence that over time (90 days) a decrease in the total microbial number and the number of sulfate-reducing bacteria, as well as the formation of a microbial biofilm, was observed on polypropylene, compared to quartz sand (Tkachuk & Zelena, 2024). The authors emphasize the need to involve sulfate-reducing bacteria (SRB) - recognized microbial degraders - in the study of plastic degradation issues (Tkachuk & Zelena, 2024). SRB was detected in vitro as part of the microbial community capable of biodegrading polypropylene (Cacciari et al., 1993). An increase in the number of SRB (*Desulfotomaculum*) was also found in vitro on the surface of polypropylene samples (Malakhova et al., 2023).

The main soil pollutants are toxic metals/metalloids, organic pollutants, antibiotics, pesticides (Raffa & Chiampo, 2021; Li et al., 2022). Regarding the combined effect of microplastics and pesticides, additional research is needed to understand their further ecological fate and the ecological risks of the interaction (Peña et al., 2023). Under the influence of heavy metals and arsenic, inhibition of biofilm formation by soil saprotrophic microorganisms *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, *B. mucilaginosus*, *Pectobacterium carotovorum* and *Escherichia coli* on the surface of plastic plate (Bybin et al., 2021). Due to the effect of microplastics of polystyrene and polytetrafluoroethylene and arsenic on the soil microorganisms of the rhizosphere of rice, a decrease in the number of *Proteobacteria*, an increase in the number of *Chloroflexi* and *Acidobacteria* in the soil, and inhibition of the activity of soil urease, acid phosphatase, protease, dehydrogenase, peroxidase was noted (Dong et al., 2021). The use of rhizosphere microorganisms

to remove microplastics from the soil is called rhizoremediation, which is considered one of the promising strategies for bioremediation of soils contaminated with microplastics (Thapliyal et al., 2024).

Additives to plastic, such as dyes, flame retardants, stabilizers, plasticizers have a negative effect on soil microorganisms (Zaborowska et al., 2020), which can increase the inhibitory effect of pollutants on the formation of biofilms on microplastics. As a result, both the processes of formation of microbial biofilms on microplastics and its biodegradation would be disrupted, and therefore the time of preservation of the material in the soil will increase. Bacterial bioremediation of plastics (particularly polyester) can increase biofilm levels, as shown by manipulating levels of cyclic-di-HMP (Howard & McCarthy, 2023). Genetic manipulation of microorganisms allows obtaining strains with high bioremediation indicators (Thapliyal et al., 2024).

Since the processes of degradation of microplastics and the release of plastic oligomers, monomers and additives, in particular, phthalates and bisphenols, are slow, the consequences of exposure to microplastics for the environment are long-term (Zhang et al., 2023). The use of short-term laboratory studies of the toxicity of microplastics against pure cultures of microorganisms and one type of microplastics are detached from real environmental conditions (Zhang et al., 2023). The above determines the need for long-term field research. Previous studies took into account the properties of microplastics (particle size and type), as well as the type of soil (texture and components), but the issue of the influence of the soil environment (dry, flooded, etc.) on microbial communities was not covered, which requires additional research (Pang et al., 2023).

Therefore, microbial remediation of soils contaminated with microplastics is considered an environmentally safe bioremediation approach, the mandatory stage of which is the formation of microbial biofilms on the surface of microplastics. Further research should be focused on determining the impact of toxicants (in particular, pesticides present in agroecosystems) on the biofilm formation of soil microorganisms-biodegraders on the surface of microplastics (with attention to sulfate-reducing bacteria) with an assessment of their ability to biodegrade.

## Conclusions

Therefore, the sources of microplastics in agricultural soils are plastics used to cover fertilizers, pesticides and seeds, film for mulching, use of wastewater for irrigation, sludge from wastewater treatment as fertilizers. The increase in the amount of microplastics in the soil affects its physico-chemical parameters, soil biota, the behavior of pesticides, which can lead to the occurrence of environmental risks both for the functioning of agroecosystems and for human health. In addition, the accumulation of microplastics in agricultural soils is alarming in view of the increase in greenhouse gas emissions and the risks of climate warming. The use of microbial remediation is a promising direction for the removal of microplastics from agricultural soils.



## References

- Arab, M., Yu, J., & Nayebi, B. (2024). Microplastics in Sludges and Soils: A Comprehensive Review on Distribution, Characteristics, and Effects. *ChemEngineering*, 8(5), 86. <https://doi.org/10.3390/chemengineering8050086>
- Bao, X., Gu, Y., Chen, L., Wang, Z., Pan, H., Huang, S., Meng, Z., & Chen, X. (2024). Microplastics derived from plastic mulch films and their carrier function effect on the environmental risk of pesticides. *Sci. Total. Environ.*, 924, 171472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171472>
- Bhatt, P., Verma, A., Gangola, S., Bhandari, G., & Chen, Sh. (2021). Microbial glycoconjugates in organic pollutant bioremediation: recent advances and applications. *Microb. Cell Fact.*, 20, 72. <https://doi.org/10.1186/s12934-021-01556-9>
- Biswal, T., & Malik J. A. (2022). Role of biofilms in bioremediation. In J. Ah. Malik (Ed.), *Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation*, Chapter 11, (pp. 205-225). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90452-0.00016-5>
- Bybin, V. A., Belogolova, G. A., Markova, Y. A., Sokolova, M. G., Sidorov, A. V., Gordeeva, O. N., & Poletaeva, V. I. (2021). Influence of Heavy Metals and Arsenic on Survival and Biofilm Formation of Some Saprotrophic Soil Microorganisms. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(8), 343. <https://link.gale.com/apps/doc/A672059329/AONE?u=googlescholar&sid=googleScholar&id=9c6ea7e5>
- Cacciari, I., Quatrini, P., Zirletta, G., Mincione, E., Vinciguerra, V., Lupattelli, P., & Giovannozzi Sermanni, G. (1993). Isotactic polypropylene biodegradation by a microbial community: physicochemical characterization of metabolites produced. *Appl. Environ. Microbiol.*, 59, 3695–3700. <https://doi.org/10.1128/aem.59.11.3695-3700.1993>
- Center for International Environmental Law (CIEL). (2022.) Sowing a plastic planet: how microplastics in agrochemicals are affecting our soils, our food, and our future. 26 p. [https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2022/12/Sowing-a-Plastic-Planet\\_1dec22.pdf](https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2022/12/Sowing-a-Plastic-Planet_1dec22.pdf)
- Chen, Y., Wang, X., Wang, X., Cheng, T., Fu, K., Qin, Z., & Feng, K. (2022). Biofilm Structural and Functional Features on Microplastic Surfaces in Greenhouse Agricultural Soil. *Sustainability*, 14(12), 7024. <https://doi.org/10.3390/su14127024>
- Chen, X., Xie, Y., Wang, J., Shi, Z., Zhang, J., Wei, H., & Ma, Y. (2023). Presence of different microplastics promotes greenhouse gas emissions and alters the microbial community composition of farmland soil. *Sci. Total. Environ.*, 879, 162967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162967>
- Dong, Y., Gao, M., Qiu, W., & Song, Z. (2021). Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 211, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111899>
- Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environ. Sci. Eur.*, 28, 2. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>
- Fortuna, M., & Borysovska, O. (2021). Assessment of water pollution by microplastic. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 65, 195–206. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.195>
- Ghosh, S., Sinha, J. K., Ghosh, S., Vashisth, K., Han, S., & Bhaskar, R. (2023). Microplastics as an Emerging Threat to the Global Environment and Human Health. *Sustainability (Basel)*, 15, 10821. <https://doi.org/10.3390/su151410821>
- Gao, W., Zhang, Y., Mo, A., Jiang, J., Liang, Y., Cao, X., & He, D. (2022). Removal of microplastics in water: Technology progress and green strategies. *Green Anal. Chem.*, 3, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100042>
- Guo, J. J., Huang, X. P., Xiang, L., Wang, Y. Z., Li, Y. W., Li, H., Cai, Q. Y., Mo, C. H., & Wong, M. H. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environ.*



- Int.*, 137, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105263>
- Habib, R., Thiemann, T., & Al Kendi, R. (2020). Microplastics and Wastewater Treatment Plants - A Review. *Journal of Water Resource and Protection*, 12, 1-35. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2020.121001>.
- Howard, S. A., & McCarthy, R. R. (2023). Modulating biofilm can potentiate activity of novel plastic-degrading enzymes. *npj Biofilms Microbiomes*, 9, 72. <https://doi.org/10.1038/s41522-023-00440-1>
- Kublik, S., Gschwendtner, S., Magritsch, T., Radl, V., Rillig, M. C., & Schloter, M. (2022). Microplastics in soil induce a new microbial habitat, with consequences for bulk soil microbiomes. *Front. Environ. Sci.*, 10, 989267. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.989267>
- Langlet, R., Valentin, R., Morard, M., & Raynaud, C. D. (2024). Transitioning to Microplastic-Free Seed Coatings: Challenges and Solutions. *Polymers*, 16(14), 1969. <https://doi.org/10.3390/polym16141969>
- Lee, J., Jeong, S., & Chae, K.J. (2021). Discharge of microplastics fibres from wet wipes in aquatic and solid environments under different release conditions. *Sci. Total Environ.*, 784, 147144. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147144>
- Li, L., Han, L., Liu, A., & Wang, F. (2022). Imperfect but Hopeful: New Advances in Soil Pollution and Remediation. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19, 10164. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610164>
- Long, B., Li, F., Wang, K., Huang, Y., Yang, Y., & Xie, D. (2023). Impact of plastic film mulching on microplastic in farmland soils in Guangdong province, China. *Heliyon*, 9(6), e16587. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16587>
- Malakhova, D. V., Egorova, M. A., Leontieva, M. R., Elcheninov, A. G., Panova, T. V., Aleksandrov, Y., & Tsavkelova, E. A. (2023). Anaerobic microbial degradation of polypropylene and polyvinyl chloride samples. *Microbiology*, 92, 83–93. <https://doi.org/10.1134/S0026261722602706>
- Mani, I. (2020). Biofilm in bioremediation. In V. Ch. Pandey, & V. Singh (Eds.), *Bioremediation of Pollutants*, Chapter 18, (pp. 375-385). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819025-8.00018-1>
- Marin, E., & Rusănescu, C. O. (2023). Agricultural Use of Urban Sewage Sludge from the Wastewater Station in the Municipality of Alexandria in Romania. *Water*, 15(3), 458. <https://doi.org/10.3390/w15030458>
- Moyal, J., Dave, P.H., Wu, M., Karimpour, S., Brar, S.K., Zhong, H., & Kwong, R.W.M. (2023). Impacts of Biofilm Formation on the Physicochemical Properties and Toxicity of Microplastics: A Concise Review. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 261(1), 8. <https://doi.org/10.1007/s44169-023-00035-z>
- Nauendorf, A., Krause, S., Bigalke, N. K., Gorb, E. V., Gorb, S. N., Haeckel, M., Wahl, M., & Treude, T. (2016). Microbial colonization and degradation of polyethylene and biodegradable plastic bags in temperate fine-grained organic-rich marine sediments. *Mar. Pollut. Bull.*, 103(1–2), 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.024>
- Ng, E.e-L., Huerta Lwanga, E., Eldridge, S. M., Johnston, P., Hu, H.-W., Geissen, V., & Chen, D. (2018). An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of the Total Environment*, 627, 1377–1388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>
- Ó Briain, O., Marques Mendes, A. R., McCarron, S., Healy, M. G., & Morrison, L. (2020). The role of wet wipes and sanitary towels as a source of white microplastic fibres in the marine environment. *Water Res.*, 182, 116021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116021>
- Othman, A. R., Hasan, H. A., Muhamad, M. H., Ismail, N. I., & Abdullah, S. R. S. (2021). Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. *Environ. Chem. Lett.*, 19, 3057-3073. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01197-9>

- Pang, X., Chen, C., Sun, J., Zhan, H., Xiao, Y., Cai, J., Yu, X., Liu, Y., Long, L., & Yang, G. (2023). Effects of complex pollution by microplastics and heavy metals on soil physicochemical properties and microbial communities under alternate wetting and drying conditions. *J. Hazard. Mater.*, *458*, 131989. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131989>
- Peña, A., Rodríguez-Liévana, J. A., & Delgado-Moreno, L. (2023). Interactions of Microplastics with Pesticides in Soils and Their Ecotoxicological Implications. *Agronomy*, *13*(3), 701. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030701>
- Qian, H., Zhang, M., Liu, G., Lu, T., Qu, Q., Du, B., & Pan, X. (2018). Effects of soil residual plastic film on soil microbial community structure and fertility. *Water Air Soil Pollut.*, *229*, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3916-9>
- Quilliam, R. S., Pow, C. J., Shilla, D. J., Mwesiga, J. J., Shilla, D. A., & Woodford, L. (2023). Microplastics in agriculture – a potential novel mechanism for the delivery of human pathogens onto crops. *Front. Plant Sci.*, *14*, 1152419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1152419>
- Raffa, C. M., & Chiampo, F. (2021). Bioremediation of Agricultural Soils Polluted with Pesticides: A Review. *Bioengineering (Basel)*, *8*(7), 92. <https://doi.org/10.3390/bioengineering8070092>
- Ragoobur, D., Huerta-Lwanga, E., & Somaroo, G. D. (2021). Microplastics in agricultural soils, wastewater effluents and sewage sludge in Mauritius. *Sci. Total. Environ.*, *798*, 149326. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149326>
- Rajcoomar, S., Amoah, I.D., Abunama, T., Mohlomi, N., Bux, F., & Kumari, S. (2024). Biofilm formation on microplastics in wastewater: insights into factors, diversity and inactivation strategies. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, *21*, 4429–4444. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05266-0>
- Ren, X., Tang, J., Liu, X., & Liu, Q. (2020). Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and the microbial community in fertilized soil. *Environ. Pollut.*, *256*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113347>
- Rusyn, I., Malovanyy, M., Tymchuk, I., & Synelnikov, S. (2021). Effect of mineral fertilizer encapsulated with zeolite and polyethylene terephthalate on the soil microbiota, pH and plant germination. *Ecological Questions*, *32*(1), 1–12. <https://doi.org/10.12775/EQ.2021.007>
- Sa'adu, I., & Farsang, A. (2023). Plastic contamination in agricultural soils: a review. *Environ. Sci. Eur.*, *35*, 13. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00720-9>
- Sharmin, S., Wang, Q., Islam, M. R., Wang, W., & Enyoh, C. E. (2024). Microplastic Contamination of Non-Mulched Agricultural Soils in Bangladesh: Detection, Characterization, Source Apportionment and Probabilistic Health Risk Assessment. *Journal of Xenobiotics*, *14*(2), 812–826. <https://doi.org/10.3390/jox14020046>
- Thapiyal, Ch., Priya, A., Singh, S. Bh., Bahuguna, V., & Daverey, A. (2024). Potential strategies for bioremediation of microplastic contaminated soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, *6*, 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.05.001>
- Tkachuk, N., & Zelena, L. (2021). The impact of bacteria of the genus *Bacillus* upon the biodamage/biodegradation of some metals and extensively used petroleum-based plastics. *Corrosion and Materials Degradation*, *2*(4), 531–553. <https://doi.org/10.3390/cmd2040028>
- Tkachuk, N., & Zelena, L. (2023). Some Microbiological Characteristics of the Biofilm on the Surface of Pre-Production Pellets of Polypropylene Microplastics after Short Exposure in Soil. *Engineering Proceedings*, *56*(1), 13. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15350>
- Tkachuk, N., & Zelena, L. (2024). Microbiological indicators of the biofilms microparticles of quartz sand and polypropylene after short-term exposure in soil. *Biofouling*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/08927014.2024.2406340>
- Thapiyal, Ch., Priya, A., Singh, S. Bh., Bahuguna, V., & Daverey, A. (2024). Potential

- strategies for bioremediation of microplastic contaminated soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 117-131. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.05.001>
- Ullah, R., Tsui, M. T., Chen, H., Chow, A., Williams, C., & Ligaba-Osena, A. (2021). Microplastics interaction with terrestrial plants and their impacts on agriculture. *J. Environ. Qual.*, 50(5), 1024-1041. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20264>
- Yurchenko, V. O., Melnikova, O. H., Ponomarov, K. S., & Samokhvalova, A. I. (2021). Microplastics in bottom sediments of rivers in urbanized areas. *Ecologically sustainable development of urban systems: challenges and solutions*: Proceedings of International scientific and practical internet conference (Kharkiv, 2–3 November, 2021), 134-136. Kharkiv, 2021. <http://eprints.kname.edu.ua/60576/1/C%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA21-134-136.pdf> (in Ukrainian)
- Zaborowska, M., Wyszkwowska, J., & Borowik, A. (2020). Soil Microbiome Response to Contamination with Bisphenol A, Bisphenol F and Bisphenol S. *Int. J. Mol. Sci.*, 21(10), 3529. <https://doi.org/10.3390/ijms21103529>
- Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the “plastisphere”: Microbial communities on plastic marine debris. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 7137–7146. <https://doi.org/10.1021/es401288x>
- Zhang, X., Li, Y., Lei, J., Li, Z., Tan, Q., Xie, L., Xiao, Y., Liu, T., Chen, X., Wen, Y., Xiang, W., Kuzyakov, Y., & Yan, W. (2023). Time-dependent effects of microplastics on soil bacteriome. *Journal of Hazardous Materials*, 447, 130762. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130762>

# Assessment of air pollutants when burning alternative fuels

Olena Levytska , Artem Sikorsky 

**Purpose.** The aim of the work is to identify potential agricultural waste that can become energy sources, which will significantly reduce the cost of the operation of small and medium-sized boilers and provide cost savings for small and medium-sized businesses. **Design / Method / Approach.** An analytical review of scientific articles, information from Internet resources is carried out in order to determine the most common and suitable for the purposes of energy production using agricultural waste, as well as the experience of enterprises in the production of alternative fuels is analyzed. **Findings.** The analysis of information sources has shown that wood waste, straw, flax fescue, sunflower husks can be attributed to secondary raw materials that can be used as an energy resource. Technologies for obtaining briquettes and pellets are applicable to such waste and can be used for the operation of low- and medium-sized boiler units. The calculations carried out by the researchers show that emissions from the incineration of the industrial gases such as processed coke-oven and blast-furnace gases and also solid waste are comparable and for a number of chemicals are less than during the combustion of popular fuel oils. **Theoretical Implications.** Assessment of pollutant emissions from the combustion of different types of fuels will show the level of environmental impact and stimulate the scientific search for the most optimal and environmentally friendly fuels. **Practical Implications.** The studies conducted by the authors stimulate the choice of alternative energy sources, which is an economically profitable and environmentally sound action. **Originality / Value.** The comparative characteristics of alternative and traditional fuels are relevant due to the exhaustibility of traditional fuels. In addition, the use of waste as an energy resource leads to the abolition or reduction of costs associated with waste management and eliminates the cost of money for the extraction of energy resources. **Research Limitations / Future Research.** In the future, it is planned to expand the range of alternative energy sources and analyze emissions from their combustion. Of course, an important stage of the research will be the comparison of emissions from the combustion of the studied fuels and traditionally used in the energy industry fuels. **Paper Type.** Practitioner Paper.

## Keywords:

agricultural waste, alternative energy sources, secondary raw materials, air pollutants

---

## Contributor Details:

Olena Levytska, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [LLevi@ukr.net](mailto:LLevi@ukr.net)

Artem Sikorsky, Undergraduate student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [sikorskiy707@gmail.com](mailto:sikorskiy707@gmail.com)

---



Energy sources can be classified into two main types: traditional and alternative. The former includes minerals such as gas, oil, and coal, while the latter often includes resources such as sun, water, and wind. The main difference between the two is renewability in nature: traditional sources are exhaustive, while alternative ones are infinite. Also today, alternative sources include by-products and waste from industrial and craft production.

The benefits of using resource-efficient technologies are recalled in the article (Trus et al., 2024). Articles (Alonso-Almeida et al., 2016; García-Pozo et al., 2015; García-Pozo et al., 2016) talks about using of materials including energy and surface area per unit output. Combustion products of traditional and alternative fuels (oxides of carbon, nitrogen, sulfur compounds, methane, etc.) significantly affect the quality of atmospheric air (Levytska, 2024).

In article (Levytska et al., 2021) air pollutants were assessed when burning natural and industrial gases. Thuswise, interdisciplinary international consortium of research centre (ArcelorMittal Global R&D Asturias and Maizières, Centro Sviluppo Materiali, Swerea MEFOS, VDEh-Betriebsits) has successfully implemented project aimed at expanding the use of blast-furnace gas in steel-making furnaces (V. Cuervo-Piñera et al., 2017).

## Research Question

The most important tasks of the work were the selection of optimal alternative energy sources for the combustion of small and medium-sized boilers, the assessment of emissions in the atmosphere during the combustion of alternative fires and the assessment of the environmental impact of alternative fires.

Blast-furnace and coke-oven gases are obtained as co-products in metallurgical and cake and by-product processes. Synthesis of these gases is not accompanied by waste generation and exploitation of soil ecosystems. In Ukraine, vacuum-carbonate, arsenic-soda and mono-ethanolamine purification methods, integrated purification of coke-oven gas from hydrogen sulphide and ammonia with ammonia decomposing using high-efficient catalysts have been developed. Wood waste is often used for the operation of the industrial boilers. We are talking about waste from wood processing and furniture production workshops, used wooden containers. With proper drying, the raw material has sufficient thermal characteristics, does not contain extremely hazardous substances in its composition.

Straw is one of the most efficient fuels, used in significant quantities in Denmark. Depending on weather conditions, it can contain up to 20% water, which evaporates during drying or during combustion. Depending on the fertilizers applied, straw can be a source of nitrogen and sulfur. If there are other impurities (compounds of sodium, heavy metals, etc.), from the point of view of environmental safety, it is better not to use the material as fuel.

Flax fescue - woody parts of the stems of spinning plants (flax, hemp, kenaf, etc.) obtained from the trust during its primary processing can also serve as a source of energy. Due to its high energy efficiency and low CO<sub>2</sub> emissions, flax-seed fescues can become a powerful resource in the alternative fuel market.

Sunflower husks - waste during oil production, are also being studied as a

possible source of energy. In particular, fuels are made from waste (as well as from wood waste). With its great potential and prevalence in agriculture, sunflower husks can be an affordable alternative.

The choice between alternative and traditional energy sources remains the main debate in global energy policy. The fuels in question - wood waste, straw, flax fescue and sunflower husks - represent only a drop in the boundless ocean of possibilities. Finding a balance between the use of natural resources and the preservation of the environment is becoming a key task for the development of sustainable and renewable energy. A few questions arise in the process of using traditional fuels. The main driving force on the way of searching for alternative energy sources is the fullness of fossil fuels. Also, traditional fuels become powerful sources of pollutant emissions when burned. How do alternative fuels contribute to environmental pollution? Which fuels are more harmful to the environment? We will try to answer these questions.

## Methodology

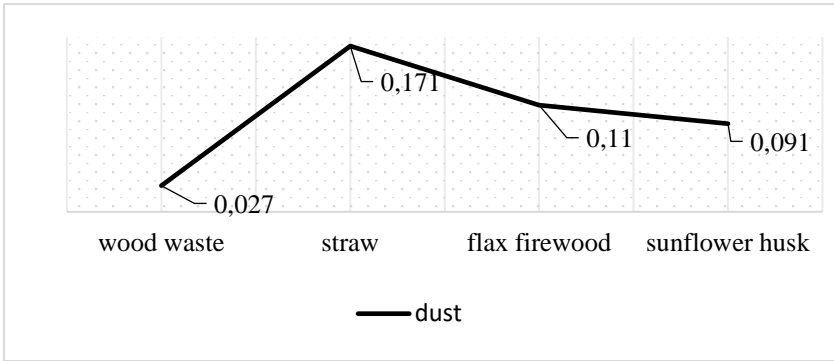
When determining the gross emission of hazardous substances for combustion units, there is used the method of continuous measurements with the application of in-process control devices or as per calculation of the index of hazardous emission. The provided calculations and the introduction of simplified formulas serve as an example for the calculation of emission factors and emissions in assessing the level of safety of existing equipment and can be used in the development of permit documents of enterprises that carry out emissions of harmful substances to the environment. The paper compares emissions of pollutants during the combustion of traditional and alternative fuels.

## Discussion and Results

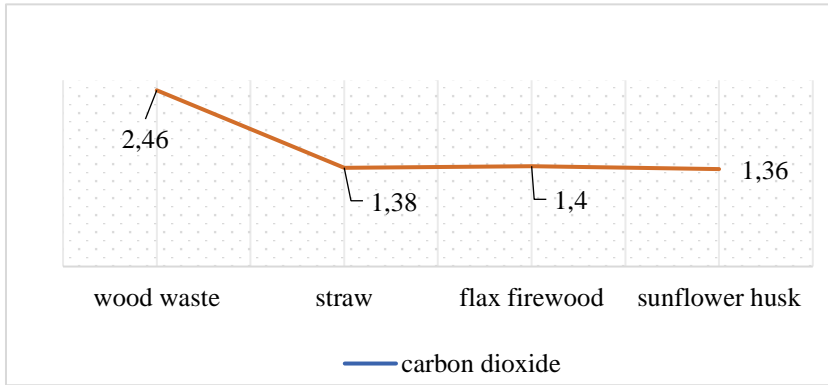
It was shown that the gases used in coke and metallurgical industries, which are used as analogues of natural, are logical to use, but require the installation of treatment systems. The paper defines a formula for calculating the carbon content in natural gas. Coke-oven gas consists of pyrogenic water vapours, coal-tar pitch, methane, hydrogen, carbon oxides and dioxides, nitrogen compounds, ammonia, hydrogen sulphide, ammonocarbonous acid, a large amount of unsaturated aromatic hydrocarbons, naphthalene and other substances.

The value of sulfur-dioxide emission index for blast-furnace gas is higher. But the emission of this pollutant in the process of combustion of blast-furnace gas is significantly lower than the similar emission in the process of combustion of coke-oven gas as a result of much lesser lower wet heating values. Mercury emission indexes and emissions are low. When comparing emissions of the above gases, mercury emissions are substantially lower for the natural gas.

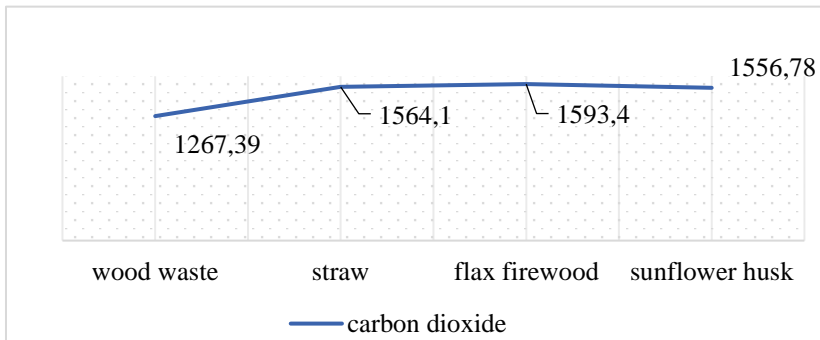
Thus, alternative fuels have both advantages and disadvantages in comparison with natural gas. However, by using purification systems in the processes of obtaining and burning these gases, it is possible to use them for production purposes and premises heating (Fig. 1 a, b, c).



a



b



c

Figure 1 – Emissions of: a – dust; b – NOx; c – carbon dioxide (Source: Author)

The paper compares emissions of pollutants during the combustion of solid alternative fuels (Fig. 1 a, b, c).

Dust (suspended solid particles) formed during the combustion of solid fuels are captured by cyclones, the efficiency of which can reach 95.5%–99.8%. Therefore, in the calculations, we will take the average value of the specified range – 98%. When using gaseous fuels, there will be no emissions of these pollutants.

The highest emission rates will be when using straw. A high value of dust emission is typical for straw and flax fescue.

The practice of operation of power equipment shows that nitrogen treatment equipment is practically not used in Ukraine. In terms of nitrogen oxide emissions, wood waste has the highest values.

Emissions from power equipment today are practically not purified from methane and NMVOCs. Therefore, no calculated corrections are made when determining the emission indicators of these compounds. Sulfur dioxide emissions when burning straw will be 2 kg per ton of fuel, when burning sunflower husks – 3.2 kg per ton of fuel.

Slightly lower values for the emission of carbon dioxide, methane, NMVOC are determined for wood waste.

It is important to note that when gaseous fuels are burned, there will be no emissions of suspended particulate matter. It should also be noted that natural gas and wood waste do not contain sulfur-containing compounds, which ensures the absence of sulfur dioxide in flue gases when fuels are burned. However, when gases are burned, mercury compounds can be released in trace amounts.

These calculations add relevant information that will be useful in today's discussions about the exhaustibility and replacement of non-renewable energy sources, the safety of alternative renewable fuels and their advantages in comparison with non-renewable ones.

## Conclusions

Solid alternative fuels are rapidly gaining popularity. There are fewer and fewer skeptics on this issue. Countries with leading economies, namely Denmark, Norway, Sweden, have competitive technologies for processing solid waste. The most suitable industry that is becoming an irreplaceable supplier of energy resources is agriculture. Every year, tons of waste after growing grain, harvesting sunflowers, corn, flax are sent to the production of pellets and briquettes.

Woodworking is another resource for obtaining fuel. Eco-friendly wooden log cabins, wood in the interior is becoming popular with consumers around the world. Of course, even the waste from this production produces quality fuel. In addition, attention should be paid to household waste. Overflowing landfills in different parts of the world, sometimes near the ocean coast, can become a quality resource for obtaining biogas. This will solve the problem of emissions of pollutants into the air that are formed after the fermentation of organic waste.

It should be noted that when burning natural gas, there will be no emissions of suspended particulate matter and sulfur dioxide. When natural gas is burned, mercury is present in the emissions in trace amounts. Thus, each type of fuel under



consideration has a negative impact on the environment. Considering the emissions of pollutants during the combustion of the considered types of fuels, it can be noted that among non-renewable fuels, it is natural gas that has advantages over fuel oils. When comparing non-renewable fuels with biomass, the latter is safer from an environmental point of view. With the provision of rational fuel combustion regimes and the reduction of emissions of suspended particulate matter, methane and NMVOC, the prospects for the use of alternative fuels will be indisputable.

## References

- Alonso-Almeida, M.-M., Rocafor, A., & Borrajo, F. (2016). Shedding Light on Eco-Innovation in Tourism: A Critical Analysis. *Sustainability*, 8(12), 1262. <https://doi.org/10.3390/su8121262>
- Cuervo-Piñera, V., Cifrián-Riesgo, D., Nguyen, P.-D., Battaglia, V., Fantuzzi, M., Della Rocca, A., Ageno, M., Rensgard, A., Wang, C., Niska, J., Ekman, T., Rein, C., & Adler, W. (2017). Blast Furnace Gas Based Combustion Systems in Steel Reheating Furnaces. *Energy Procedia*, 120, 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.215>
- García-Pozo, A., Sánchez-Ollero, J. L., & Marchante-Lara, M. (2015). Eco-innovation and management: an empirical analysis of environmental good practices and labour productivity in the Spanish hotel industry. *Innovation*, 17(1), 58–68. <https://doi.org/10.1080/14479338.2015.1011057>
- García-Pozo, A., Sánchez-Ollero, J.-L., & Ons-Cappa, M. (2016). ECO-innovation and economic crisis: a comparative analysis of environmental good practices and labour productivity in the Spanish hotel industry. *Journal of Cleaner Production*, 138, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.011>
- Levytska, O. (2024). Peculiarities of ecologically oriented recreational complexes of Europe. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Chemistry, Chemical Technology and Ecology*, 1(11), 69–77. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2024.01.09>
- Levytska, O. H., Voytenko, Y. V., & Orishechok, A. O. (2021). Comparative assessment of gaseous fuel emission. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Chemistry, Chemical Technology and Ecology*, 1(5), 83–91. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2021.01.13>
- Trus, I., Halysh, V., Gomelya, M., & Radovenchyk, V. (2024). Water deironing through the reagent and biosorption treatment and utilization of iron-rich sediments and biosorbents in cement production. *Chemistry and Ecology*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/02757540.2024.2396824>

# Підвищення екологічної безпеки шляхом знепилення аглозавів

Юлія Войтенко 

**Purpose.** The purpose of the work is to analyze the main sources of dust formation in the conditions of agglomeration production, to study the characteristics of agglomeration gases, to improve the environmental safety of industrial regions by reducing the concentration of dust in agglomeration gases due to the treatment of the agglomeration charge with solutions of surface-active substances. **Design / Method / Approach.** The work used laboratory, bench and field research methods for determining the parameters of processing bulk materials with surface-active substances, industrial methods for determining the degree of dedusting of combustible gases. **Findings.** The main methods of dedusting sintering gases are analyzed, it is shown that it is possible to reduce dust in agglomeration gases by improving the lumping of the sintering charge. It was determined that it is possible to optimize the processes of agglomerate sintering by treating the agglomerate with solutions of surface-active substances. Experimental studies were carried out in industrial conditions to determine the concentration of dust in aglogazes at different sites. It is shown that the concentration of dust decreases when the slag charge is treated with solutions of surface-active substances before its sintering. **Theoretical Implications.** The study expands the understanding of alternative methods of dedusting by optimizing the technological process. **Practical Implications.** The proposed system for treating the slag charge with a solution of surface-active substances can be used in other technological processes, which makes it possible to significantly reduce dust emissions into the environment. **Originality / Value.** The work contains an original solution to increase the efficiency of agglomeration of sinter charge, which leads to a decrease in the concentration of dust in sintering gases. **Research Limitations / Future Research.** The study is limited to the analysis of dustiness reduction of agglomeration production gases. Future research may focus on expanding the scope of the recommended bulk material handling system. **Paper Type.** Practitioner paper.

## Keywords:

dust suppression, environmental safety, agglomeration gases, surface-active substances, sintering charge, dust concentration, industrial emissions

## Contributor Details:

Yuliia Voitenko, Cand.Sc., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, voitenko\_y@365.dnu.edu.ua



В даний час пилові викиди промислових підприємств гірничо-чодобувної, металургійної, будівельної та інших галузей промисловості досягли таких масштабів, що в деяких великих промислових центрах запиленість повітря в межах селітебних територій часто значно перевищує гранично-допустимі концентрації, внаслідок чого заводські райони цих міст стають непридатними для проживання.

Одним з основних джерел забруднення атмосферного повітря в містах України є підприємства чорної металургії. В районах розташування потужних металургійних підприємств забруднення атмосфери на 50 – 60 % і більше обумовлено викидами саме цих підприємств (Фещенко & Каменева 2016). Одним з основних джерел забруднення атмосферного повітря є агломераційне виробництво. Аналіз основних джерел пилоутворення на аглофабриках показує, що основним джерелом надходження пилу в атмосферу є процеси спікання агломераційної шихти на агломашинах.

## **Мета і завдання**

Метою роботи є аналіз основних джерел пилоутворення в умовах агломераційного виробництва, дослідження характеристик агломераційних газів, підвищення екологічної безпеки промислових регіонів за рахунок зниження концентрації пилу в аглогазах внаслідок обробки агломераційної шихти розчинами поверхнево-активних речовин (ПАР).

## **Матеріали та методи**

В роботі використовувались лабораторні, стендові та натурні методи досліджень при визначенні параметрів обробки сипучих матеріалів поверхнево-активними речовинами, промислові методи визначення ступеню обезпилення аглогазів.

## **Обговорення та результати**

Як показали дослідження пилогазодинамічних процесів, виконані безпосередньо в умовах експлуатації аглофабрики ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», основним джерелом надходження пилу в атмосферне повітря в умовах цього виробництва є процеси спікання аглошихти на полетах агломашин. Причому надходження пилу в аглогази в процесі спікання аглошихти, а також при транспортуванні і перевантаженні готового агломерату залежить від якості її грудкування, газопроникності шару шихти на палетах агломашин та ефективності спікання агломерату (Піцик & Шишацький, 2013). Для підвищення ефективності процесу агломерації необхідно забезпечити таку газопроникність спікаемого шару, при якій кількість повітря, що просмоктується експаустером, і продуктів згоряння буде достатнім для повного згоряння коксового дрібязку, активізації процесів взаємодії між мінералогічними компонентами шихти, збільшення вертикальної швидкості

спікання (Kasheev at al., 2020). Оптимізація газопроникності спікаємого шару дозволяє інтенсифікувати процеси тепломасообміну в спікаємому шарі. За рахунок підвищення повноти згоряння коксового дріб'язку в шихті можливо зниження його витрат в шихті (Плясовська & Полукаров, 2021).

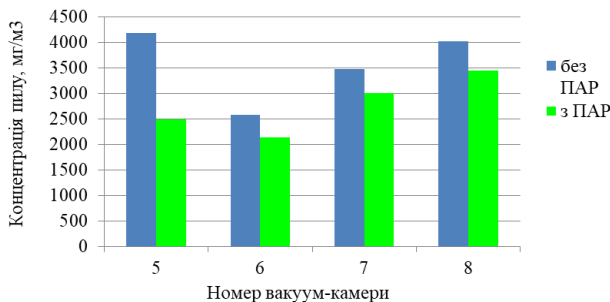
Аналіз результатів чисельних науково-дослідних робіт, присвячених боротьбі з запиленням атмосферного повітря, та виконані нами дослідження показують, що найбільш ефективним способом застосування розчинів ПАР для боротьби з пилом є обробка сипучих матеріалів піною, одержаною із відповідних розчинів ПАР (Піщик & Шишацький, 2013; Voytenko & Levytska, 2020). На основі аналізу технологічного процесу підготовки аглошихти до грудкування прийшли до висновку, що найбільш доцільно введення піни в аглошихту в шихтовому відділенні на ділянці, де в аглошихту введені усі компоненти (Shishatsky at al., 2019).

З метою визначення концентрацій пилу в аглогазах були виконані експериментальні дослідження в промислових умовах (Voytenko & Levytska, 2020). Режими обробки аглошихти забезпечували питомі витрати ПАР в аглошихті від 20 до 120 г/т.

Дослідження запиленості газів здійснювалися у вакуум-камерах, перед мультициклоном та після мультициклона перед викидом в атмосферне повітря без обробки розчинами ПАР. Потім вмикалась установка подачі та знову проводились виміри концентрації. Шляхом порівняння значень концентрацій, виміряних при промислових дослідженнях, визначалось зниження викиду часток пилу в атмосферу.

Вибір точок для вимірювань визначався як вимогами розподілу поперечного перерізу газоходу на рівнозначні ділянки, так і фактичною наявністю технологічних отворів на досліджуваних ділянках газоходів агломашин. Дослідження концентрації пилу по перетину газового потоку проводилось ваговим методом.

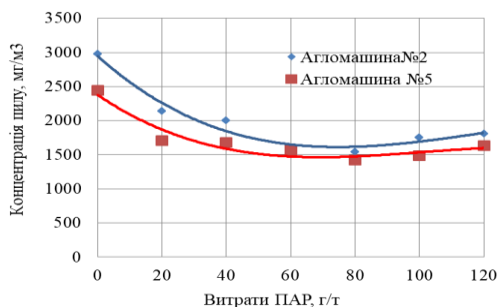
Значення концентрацій пилу в аглогазах в вакуум-камерах агломашини до обробки аглошихти розчинами ПАР та після запропонованої обробки розчинами ПАР з витратами 60 г/т наведено на рисунку 1.



**Рисунок 1 – Концентрація пилу в аглогазах в вакуум-камерах агломашини (Джерело: Створено автором)**

Розглянуто питання зниження початкової запиленості аглогазів безпосередньо під польетами агломашин. Наведені на рисунку 1 результати пилового контролю показують, що застосування ПАР для обробки аглошихти дозволяє знизити початкову запиленість аглогазів, яка вимірювалась в вакуум-камерах агломашини, від 15 % до 40 %. Це, безумовно, дозволяє зменшувати пилове навантаження на наступні апарати газоочищення: пиловловлюючі бункери під вакуум-камерами, пиловідділяючі бункери перед мультициклоном та безпосередньо на мультициклон.

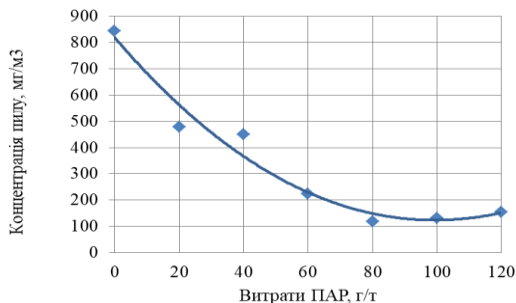
Результати вимірів концентрації пилу перед мультициклоном наведено на рисунку 2.



**Рисунок 2 – Запиленість газів (мг/м<sup>3</sup>) перед мультициклоном при різних витратах ПАР на обробку аглошихти (Джерело: Створено автором)**

Наведені на рисунку 2 дані показують, що в результаті застосування ПАР запиленість аглогазів перед мультициклонами агломашин № 2 та № 5 зменшується приблизно на 40 %. Причому рівень запиленості газів в газопроводі агломашини № 2 вище, ніж в аналогічному поперечному перерізі агломашини № 5, що можливо зумовлено високою нерівномірністю пилогазового навантаження.

Результати експериментальних досліджень концентрації пилу після очистки в мультициклоні наведено на рисунку 3.



**Рисунок 3 – Запиленість газів (мг/м<sup>3</sup>) після мультициклона при різних витратах ПАР на обробку аглошихти (Джерело: Створено автором)**

## Висновки

Результати контролю запиленості аглогазів після очищення їх в мультициклоні показують, що застосування ПАР для обробки аглошихти дозволяє знизити запиленість аглогазів, які викидаються в атмосферне повітря на 86%. Це обумовлено як зменшенням початкової запиленості аглогазів, які надходять в мультициклон, так і дисперсним складом пилу в очищуємих аглогазах.

Як видно із наведених результатів контролю запиленості аглогазів на різних ділянках руху аглогазів в газоходах агломашин застосування піни для обробки аглошихти розчинами ПАР дозволяє знизити концентрацію пилу в аглогазах на усіх ділянках газоходу.

## Посилання

- Voytenko, Y., & Levytska, O. (2020). Residential areas environmental safety improvement in the atmospheric air intensive pollution zones. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 61, 94–102. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.094>
- Kasheev, M. A., Vladi, V. A., & Rudenko, N. R. (2020). Improving the effectiveness of the gas purification equipment in agglomerative production. *Metal and Casting of Ukraine*, 28(1), 8–15. <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/91>
- Плясовська, А., & Полукаров, Ю. (2021). Методи зниження пилового забруднення на підприємствах металургійної та гірничодобувної галузей. *Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки*, 162-166. <https://confopcbproc.iee.kpi.ua/article/view/250596>
- Фещенко, О. Л., & Каменева, Н. В. (2016). Оцінка впливу діяльності металургійних підприємств на навколишнє природне середовище України. *Інвестиції: практика та досвід*, (2), 28-32. <http://www.investplan.com.ua/?op=1&z=4837&i=5>
- Піцик, Ю. В., & Шишацький, А. Г. (2013). Дослідження параметрів обробки сипучих матеріалів поверхнево-активними речовинами для знепилення повітря. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (4), 76-80. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\\_2013\\_4\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_4_15)
- Shishatsky, A. G., Voytenko, Y. V., Plyasovskaya, K. A., & Mondrusova, M. S. (2020). Дослідження фізико-хімічних процесів при оґрудкуванні аглошихти. *Journal of Chemistry and Technologies*, 27(2), 232–238. <https://doi.org/10.15421/081923>

# Можливість використання порушених гірничими роботами територій Кривбасу для розвитку вітроенергетики

Ольга Медведєва , Заряна Гальченко ,  
Олексій Демченко 

**Purpose.** Determination of the Natural Resource Potential of the Territories Disturbed by Mining Operations of Mining and Processing Plants on the Example of the Territories of the Kryvyi Rih Mining Region. **Design / Method / Approach.** The article considers the feasibility of using the territories disturbed by mining operations, in particular, waste heaps in Kryvbas, for the placement of wind power plants. On the basis of the research conducted, the authors have proved the efficiency of using wind turbines with a vertical axis of rotation. Calculation of wind energy potential for vertical and horizontal wind turbines in Kryvyi Rih. **Findings.** Areas disturbed by mining operations are promising for wind energy. It is advisable to install wind turbines with a vertical axis of rotation on waste heaps. This makes sense from an economic and environmental point of view. **Theoretical Implications.** Today, wind energy has not been studied enough, which makes it an interesting area for research. **Practical Implications.** The use of areas disturbed by mining operations for wind power allows enterprises to have energy independence for important technological processes and reduces the environmental impact. **Originality / Value.** In today's environment, industry is energy-intensive and energy-dependent, so using areas disturbed by mining operations for wind power is an innovative approach. The use of wind farms in areas with low wind speeds (such as Kryvbas) is a new approach to providing mining companies with renewable and environmentally friendly electricity. **Research Limitations / Future Research.** The authors plan to further study wind power plants, select optimal designs and calculate technological parameters for their installation. Study of the peculiarities of post-manufacturing landscapes of Kryvbas for the placement of wind power plants. **Paper Type.** Analytical Paper.

## Keywords:

wind energy, post-man-made landscapes, waste heaps, natural resourcpotential potential, vertical axis turbines, horizontal axis turbines, energy independence

---

## Contributor Details:

Olha Medvedieva, Dr.Sc., Senior Researcher, M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Dnipro, UA, medvedevaolga1702@gmail.com

Zariana Halchenko, MSc, PhD Student, M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Dnipro, UA, zhalchenko85@gmail.com

Oleksii Demchenko, PhD Student, Ukrainian State University of Science and Technologies: Dnipro, UA, dem4enkoalex@gmail.com

---



Гірнича промисловість є одним з найбільш потужних факторів антропогенного впливу на ландшафт. В районах розробки корисних копалин відбуваються локальні порушення природних ландшафтів. Велика кількість і широке розповсюдження кар'єрів з розробки корисних копалин та відвали розкритих порід суттєво впливають на загальний фон природних ландшафтів. Розрізняють прямий та непрямий вплив гірничого виробництва на природні ландшафти.

Прямий вплив складається з руйнування та перетворення ландшафтів процесами техногенної денудації та акумуляції, які відбуваються безпосередньо при гірничодобувній діяльності.

Непрямий вплив гірничодобувних підприємств полягає в забрудненні природних об'єктів токсичними викидами і скидами, забруднювачами, які розсіюються при дефляції відвалів, експлуатації енергетичних об'єктів, підприємств з переробки видобутих корисних копалин. Тривалий або інтенсивний вплив на природні ґрунтово-рослинні компоненти ландшафту призводять до їх повної деструкції і наступну активізацію природних екзогенних процесів, водної або вітрової ерозії, що, в першу чергу, призводить до порушення земель, а в подальшому повному перетворенню існуючих раніше ландшафтів і втраті ними попередньої продуктивності.

В результаті в гірничопромислових районах формуються нові за своїм генезисом, структурою і функціонуванням техногенні ландшафти. На сучасному етапі найважливішими завданнями раціонального природокористування гірничодобувних регіонів є: комплексне використання мінеральних ресурсів, видобутих із надр, охорона природного середовища, економічна ефективність існування ландшафту. Вирішення цих завдань пов'язане з визначенням поняття природно-ресурсного потенціалу ландшафту і в результаті розробкою принципово нових і вдосконаленням існуючих технологій вилучення корисних компонентів з надр, комплексної переробки видобутої мінеральної сировини із застосуванням замкнених і маловідходних схем, використання посттехногенних ландшафтів як ділянок для розміщення об'єктів альтернативної енергетики.

## **Мета**

Розглянути доцільність використання порушених гірничими роботами територій, зокрема породних відвалів Кривбасу, для встановлення вітроенергетичних установок (ВЕУ). Доказати ефективність використання ВЕУ з вертикальною віссю обертання

## **Матеріали та методи**

Природно-ресурсний потенціал – це здатність природного комплексу або окремих його компонентів задовольняти потреби суспільства в енергії, сировині, здійснювати різні види господарської діяльності.

В гірничодобувних районах, зокрема і в Кривбасі, природно-ресурсний потенціал складають порушені гірничими роботами території. Необхідно



враховувати і той факт, що негативний вплив порушених гірничими роботами територій на навколишнє середовище з часом в більшості випадків тільки посилюється, тому дуже важливо знайти можливість їхнього використання.

Проблема порушених гірничими роботами територій погіршується двома факторами – високою концентрацією гірничого виробництва – і близькістю гірничодобувних підприємств до житлової забудови. Великі порушення природних ландшафтів спостерігаються в тих місцях, де ділянки відкритих гірничих робіт чергуються або знаходяться на одних площинах з підземним видобутком.

Із розвитком добувної промисловості гостро постає проблема техногенно порушених територій. Крім прямого економічного збитку, пов'язаного з вилученням продуктивних угідь, порушені землі наносять навколишньому природному середовищу серйозний екологічний збиток.

Техногенний вплив на порушених гірничими роботами територіях полягає у наступному:

- знищення первинних природних ландшафтів або їхня глибока трансформація;

- вилучення з природного середовища корисних копалин; земельних ресурсів; рослинності; поверхневих та підземних вод;

- внесення в навколишнє середовище забруднюючих речовин в твердій фазі (розкривні породи, пуста порода, хвости збагачення, запилювання відвалів і териконів, пил від вибухів у кар'єрах); в рідкій фазі (рудничні і шахтні води, стічні води, пульпа, шлами); в газоподібному вигляді (вентиляційні викиди шахтних і рудничних газів, газоподібні речовини від вибухів в кар'єрах);

- зміна геофізичних і фізичних полів – гравітаційного, електричного, магнітного, температурного; електромагнітного випромінювання; шуму (Півняк et al., 2015).

Особливий вплив на появу порушених земель надають відкриті та підземні гірничі роботи.

На сучасному етапі найважливішими завданнями раціонального природокористування гірничодобувних регіонів є комплексне використання мінеральних ресурсів, що видобуті з надр, охорона природного середовища, економічна ефективність існування ландшафту.

Ландшафти Криворізького гірничодобувного регіону в значній мірі обумовлені промисловою діяльністю та гірничим видобутком. Наявність великої кількості відчужених земель є перспективою ефективного використання техногенно порушених земель в гірничодобувних регіонах. Зараз Криворізький залізорудний комплекс представлений 5 гірничо-збагачувальними комбінатами з 9 кар'єрами, 8 діючими шахтами, а також низкою допоміжних структур. Загальна площа відчужених земель в Криворіжжі становить 69,9 тис. га. З них під кар'єри відведено 15%, під відвали – 25%, під хвостосховища – 28%. Але з порушених площ рекультивовано всього близько 1%, а близько 8% площ знаходяться поза проведенням гірничих робіт і не

використовуються в сільському господарстві. Таким чином, існують перспективи використання альтернативних джерел енергії в умовах техногенно змінених ландшафтів гірничодобувних регіонів країни (Korach et al., 2022; Шапар et al., 2015).

## Обговорення та результати

Дуже цікавими і перспективними, в контексті ефективного використання порушених гірничими роботами територій, є можливості використання посттехногенних ландшафтів для розміщення відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), зокрема вітроенергетики (Rogers et al., 2006).

В Україні у промислових масштабах застосовуються вітрогенератори із горизонтальною віссю обертання. Стартова швидкість вітру для вітрогенераторів з горизонтальною віссю обертання становить 3,5-4,5 м/с, а номінальна – 8-12 м/с. Ці цифри притаманні для території Азовського узбережжя, але в цілому для більшості території України середня швидкість вітру складає улітку 3-6 м/с, узимку вітри сильніші – 5-8 м/с, тому для більшості території країни (в тому числі і Кривбасу) використання вітрогенераторів з горизонтальною віссю обертання є неможливим. Тому для умов Кривбасу доцільно розглянути інший вид вітрогенераторів – з вертикальною віссю обертання. Стартова швидкість таких вітрогенераторів складає 0,5 м/с і при швидкості вітру вже 3 м/с вітрогенератор може виходити на свою номінальну потужність (Климчук, 2016).

З екологічної точки зору, крім явних переваг використання вітрогенераторів, таких як: відсутність викидів і скидів, безпечність для тварин і птахів, низький рівень шуму тощо, суттєвим стає те, що для їх розташування можна і доцільно використовувати земельні ділянки, які виведені з використання за призначенням, тобто техногенно порушені землі. До них можна віднести малозаселені регіони, пустощі та виведені з дії земельні ділянки, на яких розташовано об'єкти гірничих підприємств. Наприклад, це доцільно для територій Кривбасу, де існує багато порушених гірничими роботами вільних територій. Більш раціональним і перспективним є можливість використання техногенно порушених земель для встановлення вітроенергетичних установок. Наприклад, можна розташовувати ВЕУ на породних відвалах різних висот, тим самим збільшуючи виробництво електроенергії. Середня швидкість вітру на висоті 10 м дорівнює 6 м/сек, то на висоті 100 м – вже 9,6 м/сек. Таким чином, на високих відвалах вітроенергетичний потенціал буде на 60% перевищувати рівнинний. На території міста Кривий Ріг налічується 19 відвалів розкривних порід і некондиційних руд, які займають площу близько 6,0 тис. га, а середньорічна швидкість вітру складає 2,5-3,5 м/с – ці землі є придатними для встановлення на них малих ВЕУ з вертикальною віссю обертання. В таблиці 1 представлено розрахунок вітроенергетичного потенціалу в умовах м. Кривий Ріг для вертикальних і горизонтальних ВЕУ (Medvedieva et al., 2024; Cedar Lake Ventures, Inc., 2021). З таблиці 1 видно, що для умов Кривого Рогу більш ефективним є застосування вертикальних ВЕУ, причому доведено, що їх ефективність стрімко зростає з висотою, а вироблення

електроенергії починається на більш низьких швидкостях вітру.

**Таблиця 1 – Розрахунок вітроенергетичного потенціалу для вертикальних і горизонтальних ВЕУ в умовах м. Кривий Ріг за 2021 рік (Джерело: Medvedieva et al., 2024)**

Кількість днів з вітром	Середньорічна швидкість вітру на висоті установки ВЕУ		Потужність вертикального вітряка на висоті, %		Виробництво електроенергії кВт·днів для вертикальної ВЕУ (500 кВт) на висоті		Потужність горизонтального вітряка на висоті, %		Виробництво електроенергії кВт·днів для горизонтальної ВЕУ (500 кВт) на висоті	
	20 м	100 м	20 м	100 м	20 м	100 м	20 м	100 м	20 м	100 м
12	1,15	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-
68	2,3	3,2	2	6	680	2040	-	-	-	-
97	3,45	4,8	10	21	4850	10185	-	-	-	-
81	4,6	6,4	20	40	8100	16200	-	4	-	1620
50	5,75	8	32	57	8000	14250	3	12	750	3000
29	6,9	9,6	46	80	6670	11600	7	20	1015	2900
13	8,05	11,2	57	100	3705	6500	12	48	780	3120
7	9,2	12,8	71	100	2485	3500	22	78	770	2730
4	10,35	14,4	86	100	1720	2000	39	100	780	2000
4	11,5	16	100	100	2000	2000	58	100	1160	2000
					За рік <b>38210</b>	За рік <b>68275</b>			За рік <b>5255</b>	За рік <b>17370</b>

Виходячи з результатів розрахунку (таблиця 1), при розташуванні вітроагрегатів на висоті 20 м, в умовах Кривого Рогу вертикальні вітроенергетичні установки можуть виробляти електроенергії більше ніж в 7 разів за традиційні (горизонтальні). Кількість виробленої електроенергії збільшується з висотою розташування ВЕУ.

Розташування горизонтальних вітроенергетичних установок на поверхні високого відвалу висотою 100 м збільшує кількість виробленої електроенергії з 5255 кВт·днів до 17370 кВт·днів, тобто в 3,3 рази.

Вертикальна вітроенергетична установка при аналогічних умовах розташування збільшує кількість виробленої енергії з 38210 до 68275 кВт·днів, тобто в 1,8 рази.

Порівнюючи показники вертикальних та горизонтальних установок при їх розташуванні на відвалах (68275:17370 кВт·днів) можна зробити висновок, що ефективність вертикальних ВЕУ зростає в 3,9 рази.

## Висновки

Природно-ресурсний потенціал – сукупність природних ресурсів території, що визначає міру можливого використання (при заданих технічних і соціально-економічних можливостях і при умові дотримання екологічних обмежень) компонентами природного середовища з урахуванням їхньої здатності до відновлення. Відображає ступінь участі компонентів природного середовища в задовільненні різноманітних потреб суспільства. Негативний вплив порушених гірничими роботами територій на навколишнє

середовище з часом в більшості випадків тільки посилюється, тому дуже важливо їхнє подальше використання. Таким чином необхідно знайти можливість, не повного відновлення цих територій, а ефективного їх залучення у господарську діяльність регіону.

Для Кривбасу існує можливість залучення порушених гірничими роботами територій для вітроенергетики. При виробництві електроенергії ВЕУ не забруднюють ні повітря, ні воду, ні ґрунт і не виробляють небезпечних відходів. Доказана ефективність використання вертикальних ВЕУ.

## Посилання

- Cedar Lake Ventures, Inc. (2021). *2021 Past Weather at Kryvyi Rih/Lozuvatka International Airport*. Weather Spark. <https://weatherspark.com/h/y/148677/2021/Historical-Weather-during-2021-at-Kryvyi-Rih-Lozuvatka-International-Airport-Ukraine>
- Копач, Р., Yakubenko, L., Mormul, T., Danko, T., Gorobets, N., & Halchenko, Z. (2022). Assessment of natural resource potential of territories disturbed by mining works in the context of effective use of post-technogenic landscape. *Geo-Technical mechanics Interdepartmental collection of scientific works*, (162), 38–47. <https://doi.org/10.15407/geotm2022.162.038>
- Medvedieva, O. O., Lariionov, H. I., & Halchenko, Z. C. (2024). To the selection of technology parameters for the use of renewable energy sources on man-made disturbed lands. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1319(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1319/1/012011>
- Rogers, A. L., Manwell, J. F., & Wright, S. (2006). Wind turbine acoustic noise. *Renewable Energy Research Laboratory, Amherst: University of Massachusetts*. <https://www.wind-watch.org/documents/wind-turbine-acoustic-noise/>
- Климчук, А. (2016). *Вертикальні та горизонтальні вітрогенератори: порівняння та переваги*. Енергія природи. <https://alternative-energy.com.ua/uk/vertikalni-ta-gorizontalni-vitrogeneratori-porivnyannya-ta-perevagi/>
- Півняк, Г., Шкрабець, Ф., Нойбергер, Н., & Ципленков, Д. (2015). *Основи вітроенергетики*. Національний гірничий університет. <https://core.ac.uk/download/pdf/48405972.pdf>
- Шапар, А. Г., Емець, М. А., & Копач, П. І. (2015). Перспективи використання альтернативних джерел енергії в умовах техногенно змінених ландшафтів у гірничодобувних регіонах. *Екологія і природокористування*, 19, 20–30. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecolpr\\_2015\\_19\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecolpr_2015_19_5)

# Оцінка впливу збройної агресії Росії на стан атмосферного повітря в Україні

Олена Долженкова , Діана Назаренко 

**Purpose.** The article is aimed at identifying the sources of the negative impact of Russia's armed aggression on the atmospheric air in Ukraine and the consequences of the influx of harmful substances from them on the health of the population and the state of ecosystems. **Design / Method / Approach.** The study is based on the analysis of official data on the number of destroyed military equipment, in particular, cruise missiles of various types and drones. The method of calculating unorganized pollutant emissions from non-stationary sources into atmospheric air is applied. **Findings** It was revealed that only during the period of military operations during September-October 2024, emissions into the atmosphere increased by 7.3%. Possible manifestations of the adverse effect of pollutants coming from the main sources of influence are considered. The long-term consequences of air pollution with fine dust, ammonia, and dioxins were analyzed. It was established that 56.4% of atmospheric pollution is related to the destruction of Kh-555/101, Iskander M/KN and S-300/400 missiles. The mass of harmful substances that entered the air during the downing of cruise missiles was determined and the resulting environmental damage was calculated. **Theoretical Implications.** The study provides insight into how the downing of rockets leads to environmental damage to the atmosphere, mainly caused by nitrogen and carbon oxides. **Practical Implications** Practical recommendations have been provided regarding the participation of every citizen of Ukraine in recording the damage caused to atmospheric air as a result of military actions. **Originality / Value.** The article contains an original analysis of real cases of negative consequences of the impact of armed aggression on atmospheric air and is a valuable source for further assessment of its condition. **Research Limitations / Future Research.** The study is limited to the analysis of specific data and does not cover all possible aspects of the impact on atmospheric air. Future studies can expand the understanding of the long-term effects of pollutants on people and ecosystems. **Article type.** Applied Research.

## Keywords:

atmospheric air pollution, Russia's armed aggression, impact on the environment, health of the population, harmful substances

---

## Contributor Details:

Olena Dolzhenkova, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [dolzhenkova\\_o@365.dnu.edu.ua](mailto:dolzhenkova_o@365.dnu.edu.ua)

Diana Nazarenko, Undergraduate Student, Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [nazarenko\\_d@365.dnu.edu.ua](mailto:nazarenko_d@365.dnu.edu.ua)

Під час війни, спричиненою Росією, в нашій країні як ніколи гостро поставили екологічні питання. Адже це просто неприпустимо, щоб у двадцять першому столітті, в період коли в світі є ще стільки невирішених проблем, одна країна почала збройний конфлікт на території іншої, і тим самим створила загрозливу екологічну ситуацію, яку людство намагалося покращити не один десяток років. Російська агресія проти України є суцільним екоцидом, занотувати всі прояви якого практично неможливо, в тому числі, і передбачити всі наслідки. Нашій країні прийдеться докласти багато зусиль, для того, щоб юридично довести очевидні речі – загибель мирних жителів, руйнування енергосистем, інфраструктури, промислових підприємств, мінування територій, знищення лісів, полів, крадіжки та знищення обладнання. На жаль, цей перелік можна продовжувати дуже довго. Всі українці сподіваються на успішне завершення воєнного конфлікту і разом з тим розуміють, що наслідки його впливу на навколишнє середовище будуть відчувати на собі не тільки нинішнє покоління, а й декілька прийдешніх.

## **Формулювання проблеми**

Серед усіх компонентів природного середовища атмосферне повітря, мабуть, в найбільшому ступеню піддається негативним змінам від війни, тому що внаслідок ворожих ударів по великих промислових підприємствах, нафтобазах, гідроелектростанціях, інфраструктурі, житловим будівлям й іншим важливим об'єктам в нього надходять у величезних кількостях шкідливі речовини, в тому числі токсичні, які впливають на здоров'я і життя людей і тварин, знищують унікальні екосистеми, що розташовані на території України. Предметом даного дослідження є забруднення атмосфери шкідливими речовинами

## **Дані та методи**

Негативний вплив забруднюючих речовин вивчали методом статистичного аналізу, екологічну шкоду визначали за методикою розрахунку неорганізованих викидів забруднюючих речовин або суміші таких речовин в атмосферне повітря внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій та/або під час дії воєнного стану та визначення розмірів завданої шкоди. (Міністерство..., 2022).

## **Результати негативного впливу воєнних дій на атмосферне повітря**

Третій рік поспіль Росія нещадно винищує мешканців України та робить непридатним для життя навколишнє середовище і використовує для цього всі можливі види озброєння. Навіть попри санкції, ворог закуповує воєнну техніку та її складові частини через треті країни, має постачання з Іраку, Китаю та країн, які підтримують воєнну агресію.

В табл. 1 представлено інформацію про знищену ворожу техніку за період з 2022 року по нинішній час та надходження викидів у атмосферне повітря. Але ж багато техніки ще залишається воювати і спричиняти трагічні наслідки. Якщо ж додати до наведених значень дані про наше понівечене озброєння, то вплив виявиться набагато болючішим.

**Таблиця 1 – Кількість знищеної наземної та авіаційної ворожої техніки, завдані збитки (Джерело: ЕкоЗагроза, 2024)**

Знищена техніка	Кількість, шт. 10 вересня	Кількість, шт. 10 жовтня	Вага відходів, т	Викиди в атмосферу, т
Танки	8518	8940	399418	32766
ББМ	16521	17740	238994	24797
Артсистеми	17156	19203	284531	31476
РСЗВ	1166	1223	49379	2774
Засоби ППО	926	973	34092	1734
Літаки	367	368	6790	15308
Гелікоптери	328	328	2263	1505
Автотехніка	23142	26185	370680	13132
Цистерни з паливом	77	77	1925	3054
БПЛА ОТР	13864	16686	763	232
Крилаті ракети	2438	2618	1166	8
Всього	84503	94341	1452738	129504

Тільки за останній місяць (з 10 вересня по 10 жовтня) середній приріст ліквідації техніки склав~ 9 %, при цьому в найбільшому ступеню зросло знищення БПЛА (на 20,95%), автотехніки (на 13%) та артсистем (на 11,9 %), вага відходів зросла на 8,9 %, а викиди в атмосферу підвищились на 7,3%. Заручниками знищення техніки стають атмосферне повітря, потім ґрунти та водні об'єкти, на яких осідають забруднюючі речовини (ЗР), що випадають внаслідок очищення атмосфери, люди та компоненти екосистем.

Шкода, завдана атмосферному повітрю за час війни, досягла за підрахунками Міндовкілля значення у 779,63 млрд. грн. (табл. 2).

Таким чином, найбільших втрат атмосферному повітрю завдають горіння нафти, лісових і інших насаджень.

**Таблиця 2 – Збитки атмосферному повітрю за час війни, завдані збитки (Джерело: ЕкоЗагроза, 2024)**

Джерело впливу	Шкода, млрд. грн	Кількість нафтопродуктів та газу, що згоріли, т	Площа об'єктів, що згоріли, га	Викиди в атмосферу, т
Горіння нафти	138,36	3 071 820	-	10781960,0
Викиди ЗР у повітря	0,00708	-	-	260,0
Лісові пожежі та інші насадження	635,38		85 911,0	61 354 454,0
Знищення об'єктів	5,88		192,9 38	216608,0
Всього	779,63		78754,452	112860417,0

Основними джерелами забруднення повітря та надходження шкідливих речовини від них під час воєнних дій є знищення бойової техніки, руйнування та горіння промислових підприємств, дизельні та паливні генератори, детонація боєприпасів, застосування заборонених міжнародними конвенціями боєприпасів, розмінування територій.

В умовах руйнування та пошкодження джерел електрогенерації Україні прийшлося закупити 670 тис. дизельних та паливних генераторів. Вони стали локальними джерелами шумового впливу (до 95 дБ залежно від потужності) та забруднення повітря оксидами вуглецю, азоту, сірки, дрібними частками PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub>. Дизельні генератори у найбільшому ступеню ніж паливні генерують саме PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub>, які настільки малі та рухливі, що при вдиханні потрапляють до альвеол легень та можуть за тривалої дії спричинити хронічний бронхіт, хронічне обструктивне захворювання легень (ХОЗЛ) та астму, можуть приводити до виникнення серцево-судинних захворювань і навіть до раку (2023).

Руйнування промислових об'єктів як, наприклад, 5 червня 2023 р. пошкодження трубопроводу Тольятті – Одеса з аміаком у Куп'янському районі Харківської області внаслідок російських обстрілів, призвело до його розгерметизації та витоку 134 т аміаку. Надмірна концентрація аміаку в атмосфері веде до негативного впливу на здоров'я людей, такого як подразнення очей та дихальних шляхів, бронхіт, пневмонія, набряк легень і раптова смерть. Дія аміаку на навколишнє середовище обумовлена його лужним характером – в результаті реакції молекул аміаку з кислотними компонентами, такими як діоксид сірки (SO<sub>2</sub>) утворюються атмосферні аерозолі, які погіршують якість повітря (Ангурець et al., 2022).

Під час горіння промислового електрообладнання на підприємствах утворюються поліхлоровані біфеніли та діоксини –токсичні хімічні речовини, які провокують в організмі людей генетичні порушення, появу злоякісних пухлин, прискорюють процеси старіння, пригнічують імунітет, нервову систему (Козій et al., 2017).

Сердечник багатьох бронебійних снарядів виготовляють зі збідненого урану під час вибуху та згоряння якого утворюється аерозоль радіотоксичних оксидів урану (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, UO<sub>2</sub>) із частками від 0,5 до 5 мкм. Значна кількість диспергаційних аерозолів тривалий час знаходиться в повітрі, поступово осідає на поверхні та згодом мігрує в ґрунти та ґрунтові води.

Основна небезпека від збідненого урану виникає у випадку його потрапляння в організм у вигляді пилових часток. Такі частки нерозчинного урану можуть залишатися в легених тканинах, особливо в лімфатичних вузлах, до кількох років. Уран, що потрапив до шлунково-кишкового тракту, погано всмоктується до кров'яного русла. Оскільки збіднений уран є переважно альфа-випромінювачем, небезпечним є саме його осідання в тканинах організму, де від альфа-випромінювання немає ніякого захисту. Також уран – це важкий метал, накопичення якого в організмі може призводити до порушення роботи нирок, печінки та інших органів.

У ряді регіонів, таких як Харківщина, Донбас, Сумщина, Херсонщина росіяни застосовували заборонені у 1977 додатковими протоколами до



Женевської конвенції боєприпаси з білим фосфором.

Температура горіння фосфору вкрай висока – близько 800°C. Такий фосфор залишає на одязі ледь помітні дірки, а на шкірі під ним – обвуглені органічні тканини; можуть бути пошкоджені кістки та навіть кістковий мозок. У разі вдихання розжареної суміші відбувається випалювання легень.

Усе це призводить до тяжких та болісних каліцтв, а якщо фосфор у будь-якому вигляді потрапить всередину організму, це веде до болісної смерті. Для людини летальна доза – 0,05-0,15 грама фосфору. Летальний випадок може наступити, навіть якщо опіки від фосфору покрили не більше 10% шкіри людини – смерть настає через гіпокальціємію (вимивання кальцію з крові) через 1–2 доби після події.

Значну небезпеку для атмосферного повітря становлять ракетні удари.

За даними головнокомандувача ЗСУ Олександра Сирського з 24 лютого 2022 р. по 20.08.2024 російські війська запустили по Україні 9627 ракет (2429 з них вдалось збити), близько 14 тис БПЛА (збито 9266) та 33 тис. керованих авіабомб (КАБів).

Розрахуємо масу шкідливих речовин, що надійшли у повітря з урахуванням маси бойової частини ракет різного типу (табл. 3).

Найбільшу небезпеку атмосферному повітрю спричинили збиті крилаті ракети Х-555/101, балістичні ракети Іскандер М/КН та ракети С-300/400, які численно переважали в загальній структурі ракетного озброєння і становили 63,9 %, їх частка у забрудненні повітря складала 56,4 %.

**Таблиця 3 – Надходження шкідливих речовин від знищених ракет в атмосферне повітря з початку війни (Джерело: Створено авторами)**

Тип повітряної зброї	Випущено Росією під час війни	Знищено	Маса бойової частини, кг	Маса шкідливих речовин ,г
Іскандер К та М/КН	1502	132	480	504,7
Х-555/101	1846	1441	410	529,8
Х-22/32	362	2	960	243,3
Х-35	15	1	145	1,5
Х47М2 Кинжал	111	28	500	38,85
3М-55 Онікс470	211	12	300	44,31
Калібр	894	443	450	281,61
Циркон	6	2	400	1,7
С-300/400	3008	19	180	379,0
Точка-У	68	6	482	22,9
Х-25/29/31/35/58/59/60	1547	343	170	184,1
Інші ракети	57	0	200	7,98
Всього ракет	9627	2429		2239,75
Дрон	13977	9266	15	147,0
Всього				2386,75

Спалювання або утилізація підривом балістичного – твердого ракетного палива на основі нітрату целюлози та нітроефірних розчинників, що часто

застосовують у ракетних двигунах військового призначення, супроводжується утворенням ряду токсичних компонентів (залежно від виду палива, на якому працює конкретна ракета), а саме: СО до 416,2 г/кг; С до 86,4 г/кг; Рb до 6,7 г/кг; РbО до 1,8 г/кг; NO до 161,6 г/кг; NO<sub>2</sub> до 2,9 г/кг; CH<sub>4</sub> до 55,0 мг/кг; NH<sub>3</sub> до 0,3 г/кг; HNO<sub>2</sub> до 0,4 г/кг; HCN до 5,2 г/кг, таким чином, токсична частина складає до 70 %. До цих викидів слід додати суміш продуктів, які застосовують для підриву вибухової речовини бойової частини ракети, а також токсичні продукти горіння електронного обладнання ракети (Ангу-рець et al., 2023).

Проведемо розрахунок екологічної шкоди Р<sub>ш</sub> для атмосферного повітря від збитих ракет за формулою (Міністерство..., 2022).

$$P_{ш} = M_{i \text{ викид}} \times C_{п} \times K_{неб} \times K_{в} \times K_{мп} \times K_{пп} \quad (1)$$

де M<sub>i викид</sub> – маса викиду, т; C<sub>п</sub> – ставка податку за неорганізовані викиди забруднюючих речовин, грн/т; K<sub>неб</sub> – коефіцієнт класу небезпеки забруднюючих речовин; K<sub>в</sub> – коефіцієнт впливу на довкілля в залежності від тривалості події; K<sub>мп</sub> – коефіцієнт, що залежить від масштабу події; K<sub>пп</sub> – коефіцієнт, що залежить від характеру походження події.

Коефіцієнти K<sub>в</sub>, K<sub>мп</sub>, за умов невизначеності подій приймали такими, що дорівнюють 3 та 1,2 відповідно. K<sub>пп</sub> становив 10 для воєнних умов.

Результати розрахунків наведено у табл. 4.

**Таблиця 4 – Розмір екологічної шкоди для атмосфери від згоряння бойових частин ракет за період з 24.02.2022 р. по 20.08.01.2024 р.**

(Джерело: Створено авторами)

Шкідлива речовина	Маса згорілої речовини, Мі, т	Екологічний податок, грн/т	Коефіцієнт класу небезпеки	Розмір шкоди, грн
СО	0,041	96,99	2	954,38
Рb та його сполуки	0,0000695	109127,84	5	23,11
PM <sub>10</sub> +PM <sub>2,5</sub> (сажа)	0,00062	96,99	3	16,19
NO <sub>x</sub>	0,42	2574,43	2	277493,76
СО <sub>2</sub>	85,04	30,0	2	306144,26

Велика кількість оксидів азоту після ракетних атак обумовлена застосуванням рідинних окиснювачів ракетного пального на основі азотної кислоти (речовини 1-го класу небезпечності) – АТ та АК-27І. Азотні окиснювачі, потрапляючи в ґрунтовий покрив, взаємодіють з присутніми в ґрунті лугами та утворюють нітрати і нітрити, які накопичуються у рослинах і потім завдають метгемоглобінемії (кисневого голодування органів) людині (Dolzhenkova, 2024).

Внаслідок того, що у більшості сучасних вибухових речовин використовують складі азотні сполуки, які окислюються під час вибуху, саме ці продукти чинять разом з діоксидом вуглецю та оксидом вуглецю найбільшу екологічну шкоду.

## Висновки

На сьогодні 44 країни з трьох континентів стали учасниками Реєстру збитків, завданих агресією Росії проти України. Але ніякі розрахунки не показують істинного стану атмосферного повітря і тих довгострокових змін, що очікують населення нашої країни, флору та фауну у найближчий період поки тривають воєнні дії, і після їх закінчення.

Необхідно збирати всі факти виявлених екологічних злочинів для сьогоденного прийняття управлінських рішень на всіх рівнях – від політичного керівництва держави, правоохоронців, екологічних інспекторів до пересічних громадян щодо їх подолання. Кожен українець у разі виявлення екологічних злочинів не має залишатися байдужим та має їх фіксувати для подальшого підрахунку заподіяних збитків та отримання репарацій.

## Посилання

- Dolzhenkova, O. (2024). The consequences of the influence of missile strikes on the atmospheric air condition in Ukraine. *Ecological Sciences*, 1(1 (52)), 16–21. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.2>
- Ангурець, О., Хазан, П., Колесникова, К., Куш, М., Чернохова, М., & Гавранек, М. (2022). *Наслідки для довкілля війни росії проти України*. Clean Air. <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf>
- ЕкоЗагроза. (2024). *Завдані збитки. Атмосферне повітря*. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. <https://ecozagroza.gov.ua/damage/air>
- Козій, О. І., Петрук, М. П., Витрикуш, Н. М., & Вахула, О. М. (2017). Діоксинова проблема сміттєспалювання. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Хімія, технологія речовин та їх застосування*, (868), 291-297. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/aug/14417/1709523p7-p13.pdf>
- Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2022). *Про затвердження Методики розрахунку неорганізованих викидів забруднюючих речовин або суміші таких речовин в атмосферне повітря внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій та/або під час дії воєнного стану та визначення розмірів завданої шкоди*. Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-22>

# Прогнозування рівня діоксиду сірки в атмосфері від стаціонарних та пересувних джерел забруднення

Тетяна Русакова 

**Purpose.** Analysis of the dynamics of changes in the amount of sulfur dioxide entering the atmosphere from stationary and mobile sources of pollution. **Design / Method / Approach.** The research methodology is based on the use of descriptive statistical methods to establish mathematical dependencies for forecasting the entry of sulfur dioxide into the atmosphere from stationary and mobile sources of pollution. **Findings.** Volumes of sulfur dioxide from stationary sources are greater than volumes from mobile sources, constant monitoring of air quality in the city is necessary. Stimulating actions on the part of state, regional and local authorities are necessary to reduce the entry of sulfur dioxide into the atmosphere from transport and equipment running on fuel with a high sulfur content. **Theoretical Implications.** Mathematical dependencies have been obtained for forecasting the amount of sulfur dioxide entering the atmosphere from stationary and mobile sources of pollution. **Practical Implications.** The trend of changes in the volume of sulfur dioxide intake from stationary sources of pollution for the period of 2016-2023 in Ukraine is decreasing, but in 2023 there was an increase in volumes by 7,7% compared to 2022. The trend of changes in these volumes in the Dnipropetrovsk region is not unambiguous. In 2023, the volume of sulfur dioxide increased by 57,6% compared to 2022. Over the past two years, the amount of sulfur dioxide from mobile sources of pollution has decreased by 27% due to a 28% decrease in the total number of newly registered vehicles in Ukraine for the specified years. **Originality / Value.** The analysis of statistical data is simultaneously based on the elements of descriptive statistics, on the mathematical dependencies of the dynamics of changes in the volume of sulfur dioxide entering the atmospheric air from various sources of pollution, and on the graphical presentation of statistical data. **Research Limitations / Future Research.** Future research will be aimed at establishing mathematical relationships between the volumes of sulfur dioxide from mobile sources of pollution and the species composition of transport. **Paper Type.** Empirical Paper.

## Keywords:

sulfur dioxide, atmospheric air, pollution sources, air quality monitoring, descriptive statistics

## Contributor Details:

Tetiana Rusakova, Prof., Dr.Sc., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, [rusakova\\_t@365.dnu.edu.ua](mailto:rusakova_t@365.dnu.edu.ua)



Розвиток економіки та зростаючі темпи урбанізації призводять до збільшення промислового сектору виробництва, який нарощує свої потужності з метою задовольнити потреби населення в товарах споживання та підвищити економічний рівень країни. Підвищення матеріального та соціально-економічного рівня одночасно приводить до збільшення шкідливих викидів, що надходять в навколишнє середовище від різних виробництв та транспортних засобів. За обсягами викидів переважають: діоксид вуглецю, оксид вуглецю, оксиди сірки та азоту, а також органічні сполуки, метан, сажа. За статистичними даними державної служби статистики України загальні обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря впродовж 2016-2023 років в середньому від стаціонарних джерел викидів становлять 2430,5 тис. т. на рік, від пересувних – 1557,5 тис. т. на рік. Частка викидів від пересувних джерел по відношенню до стаціонарних поступово зростає від 52,3% у 2016 році до 68,5% у 2023 році, що говорить про збільшення у населення вживаного автотранспорту з двигунами внутрішнього згорання.

Діоксид сірки в навколишньому середовищі утворюється при спалюванні палива, що містить сірку. До джерел, що використовують таке паливо відносяться: автомобілі, кораблі, дизельне обладнання, що працює на паливі з високим вмістом сірки. Також діоксид сірки викидається в атмосферне повітря під час деяких промислових процесів: видобуток природного газу та нафти, нафтопереробка, переробка сульфідних руд, хімічні процеси, а також під час вулканічної діяльності. Діоксид сірки  $\text{SO}_2$  є помірно небезпечним, але токсичним газом, який безпосередньо шкодить здоров'ю людини. Він важчий за повітря та має задушливий запах, при концентрації в атмосфері більше  $500 \text{ mg/m}^3$  може бути смертельним. При більш низьких рівнях можуть виникати болі в грудях, проблеми з диханням, подразнення очей, а також погіршення стану здоров'я у людей, що мають серцево-легеневі захворювання. При рівнях концентрації  $20 \text{ mg/m}^3$  або нижче не повинно виникати шкідливих наслідків для здорової людини. Нормальна фоновая концентрація  $\text{SO}_2$  в атмосфері зазвичай становить менше  $1,1 \dots 10 \text{ mg/m}^3$ .

Утворення сульфатів у формі аерозолів або дуже дрібних частинок у повітрі можуть призводити до посиленням нападів астми, серцево-легеневих захворювань і проблем з диханням. На віддалені від джерела викидів оксиди сірки можуть перетворюватимуться на кислоти в результаті реакцій водної фази в атмосфері. Ці кислотні аерозолі зрештою випадають у вигляді кислотних дощів, снігу або туману за відповідних метеорологічних умов. Підкислення ґрунтових і поверхневих вод призводить до виведення важких металів, знищення життя та руїнації будівель в містах.

## **Аналіз останніх досліджень**

У зв'язку з вищевказаними наслідками впливу діоксиду сірки на людину та природне середовище, значна увага в світі приділяється дослідженню надходження  $\text{SO}_2$  в навколишнє середовище, способам моніторингу та контролю, а також впливу на стан здоров'я населення. Так, в роботі (Ireaiyeda & Adegboyege, 2017, с. 5-7) проведене дослідження показало, що антропогенна

діяльність, така як спалювання викопного палива та діяльність людей в комерційних, житлових і промислових зонах відіграють велику роль у підвищенні фонових концентрацій  $\text{SO}_2$  до 15 разів. Наукові дані показують, що люди, які проживають, працюють і навчаються в межах 150 – 300 метрів від автомагістралей постійно перебувають в зоні забрудненого повітря, що спричиняє проблеми зі здоров'ям, включаючи легеневі захворювання, інсульт та передчасні пологи (Samuels & Freemark, 2021, с. 12-15). Проаналізовано вплив трафіку руху міського та приватного транспорту на забруднення атмосферного повітря, що знижує рівень громадського здоров'я (Commodore та ін., 2021, с. 4-5).

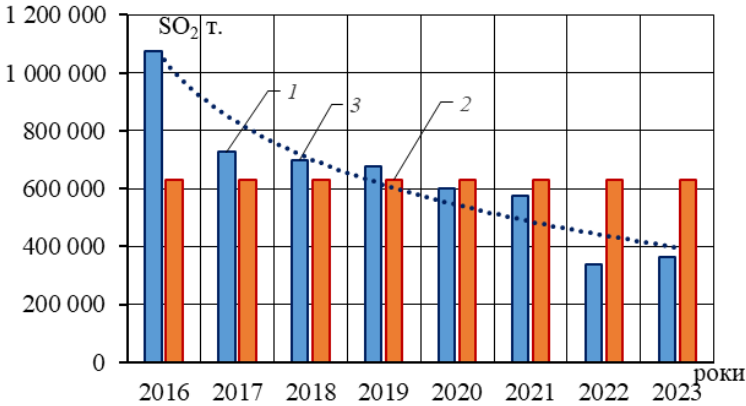
Оцінено вплив швидкості вітру, його напрямку та фонові концентрації на концентрацію забруднюючих речовин поблизу доріг (Baldwin та ін., 2015, с. 224). Проведено аналіз забруднюючих речовин поблизу великих доріг у житлових, комерційних та промислових районах міста (Ireaiyeda & Adegboyega, 2017, с. 5-7). Також показано, що хоча  $\text{SO}_2$  легко окислюється до сірчаної кислоти, як правило, протягом декількох тижнів, але  $\text{SO}_2$  відіграє набагато активнішу роль у ініціюванні та контролі глобальної потепління (Hausfather, 2024). Окрім парникових газів (таких як вуглекислий газ), які сприяють зміні клімату, в атмосферне повітря надходить багато інших газів, включаючи оксиди сірки та азоту. Існує багато наукових доказів того, що заходи щодо зменшення цих забруднюючих речовин покращують якість повітря, але, в той же час, сприяють прискоренню глобального потепління, оскільки вони призводять до усунення охолоджуючого ефекту цих газів. До цих пір регулювання зміни клімату та якості повітря обговорювались незалежно. В роботі (Kontovas, 2020, с. 3) проведено оцінювання впливу заходів щодо поліпшення якості повітря на зміни клімату, і навпаки.

## Мета та завдання

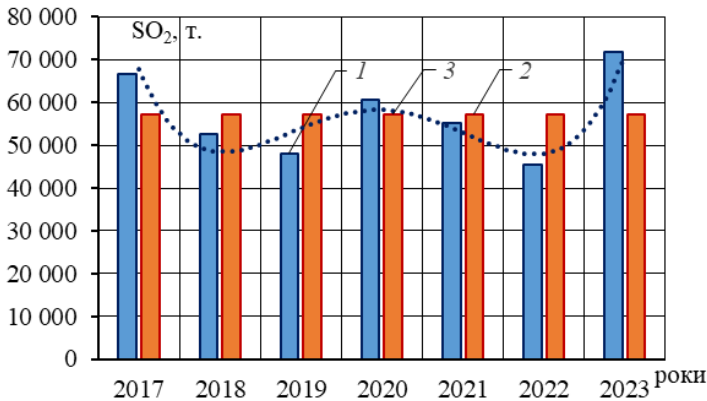
Метою даного дослідження є аналіз динаміки зміни обсягів надходження діоксиду сірки в атмосферне повітря від стаціонарних та пересувних джерел забруднення. Оцінити, як співвідносяться між собою викиди  $\text{SO}_2$  від різних джерел надходження і чим це може бути обумовлено.

## Матеріали та методи

В даній роботі на першому етапі дослідження за статистичною інформацією державної служби статистики України (Набори даних | Державна служба статистики України, 2024) та Дніпропетровської області (dnepstat.gov.ua, 2024) щодо викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря було проаналізовано динаміку зміни обсягів надходження діоксиду сірки в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення окремо та у співвідношенні між собою за 2016-2023 роки, що показано на рисунках 1-3. Тенденція зміни обсягів  $\text{SO}_2$  у атмосферне повітря за період 2016-2024 років від стаціонарних джерел забруднення дуже добре описується логарифмічною залежністю (1) з величиною достовірності 0,8988 (рис. 1, крива 3).



**Рисунок 1 – Динаміка зміни обсягів надходження SO<sub>2</sub> у атмосферне повітря за період 2016-2024 років від стаціонарних джерел забруднення по Україні (Джерело: Автор): 1 – статистичні дані; 2 – середнє значення; 3 – лінія тренду**



**Рисунок 2 – Динаміка зміни обсягів надходження SO<sub>2</sub> у атмосферне повітря за період 2016-2024 років від стаціонарних джерел забруднення по Дніпропетровській області (Джерело: Автор): 1 – статистичні дані; 2 – середнє значення; 3 – лінія тренду**

Середнє значення обсягів діоксиду сірки від стаціонарних джерел забруднення за вказаний період складає 63 1966,2 т. на рік. Найменше значення 33 8434,1 т. спостерігалось у 2022 році, що пов'язано із зупинкою багатьох виробництв в Україні в наслідок військової ситуації. У 2023 році відбулося збільшення обсягів на 7,7% в порівнянні з 2022 роком, скільки промисловий сектор відновлює свої потужності виробництва.

$$y_1(x) = -3 \cdot 10^5 \cdot \ln(x) + 10^6, \quad (1)$$

де  $x$  – роки,  $y_1(x)$  – обсяги  $\text{SO}_2$  в тонах від стаціонарних джерел забруднення по Україні.

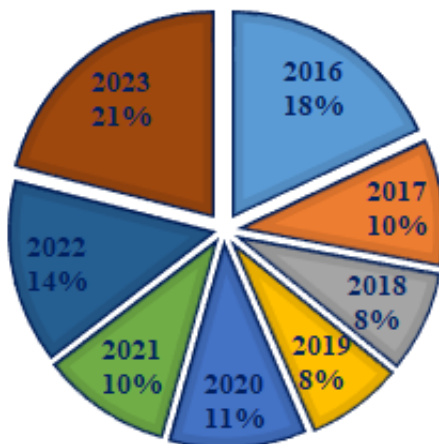
На рисунку 2 наведено розподіл обсягів надходження  $\text{SO}_2$  у атмосферне повітря за період 2017-2024 років від стаціонарних джерел забруднення по Дніпропетровській області. В 2016 році ці обсяги становили 18 1911,7 т., що в декілька разів перевищувало обсяги 2017-2023 років, тому для більш об'єктивного дослідження ці обсяги вилучено із розгляду.

Тенденція зміни обсягів  $\text{SO}_2$  представлена поліномом четвертого порядку (2), що з точністю  $R^2 = 0,876$  описує динаміку зміни цих обсягів.

Середнє значення обсягів діоксиду сірки від стаціонарних джерел забруднення за вказаний період по Дніпропетровській області складає 57 235,3 т. на рік. Найменші значення спостерігалися у 2019 та 2022 році, відповідно 48 154,4 т. та 45 531,1 т. У 2023 році також відбулося збільшення обсягів  $\text{SO}_2$  на 57,6% в порівнянні з 2022 роком, що перевищило показники 2017 та 2020 років. Підприємства Дніпропетровської області відновлюють свої потужності, але викиди  $\text{SO}_2$  є достатньо значними, що може свідчити про збільшення використання ресурсів із значним вмістом сірки та збільшенням негативного впливу на навколишнє середовище.

$$y_2(x) = 745.8 \cdot x^4 - 11800 \cdot x^3 + 64520 \cdot x^2 - 141345 \cdot x + 155577, \quad (2)$$

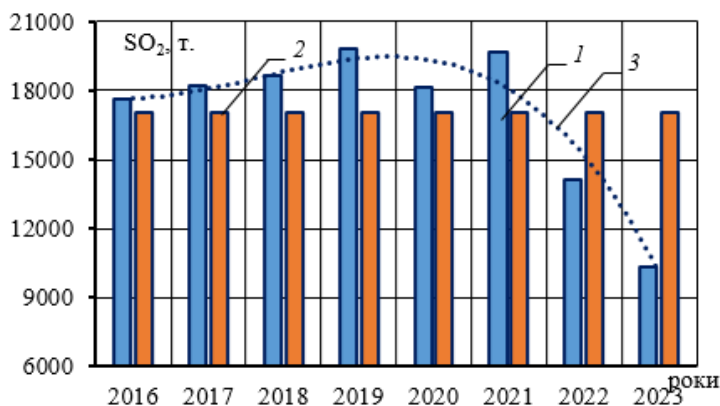
де  $x$  – роки,  $y_1(x)$  – обсяги  $\text{SO}_2$  в тонах від стаціонарних джерел забруднення по Дніпропетровській області.



**Рисунок 3 – Частка викидів  $\text{SO}_2$  від стаціонарних джерел забруднення Дніпропетровської області по відношенню до загальних обсягів  $\text{SO}_2$  по Україні (Джерело: Автор)**



Для більш детального розуміння частки викидів діоксиду сірки від стаціонарних джерел Дніпропетровської області по відношенню до загальних обсягів викидів по Україні побудовано кругову діаграму на рисунку 3. Можна бачити, що найбільші надходження спостерігалися у 2016 році – 18% та у 2023 році – 21%, що складає п'яту частину усіх обсягів SO<sub>2</sub> по Україні, тому що Дніпропетровська область є потужним промисловим центром України.



**Рисунок 4 – Динаміка зміни обсягів надходження SO<sub>2</sub> у атмосферне повітря за період 2016-2024 років від пересувних джерел забруднення по Україні (Джерело: Автор): 1 – статистичні дані; 2 – середнє значення; 3 – лінія тренду**

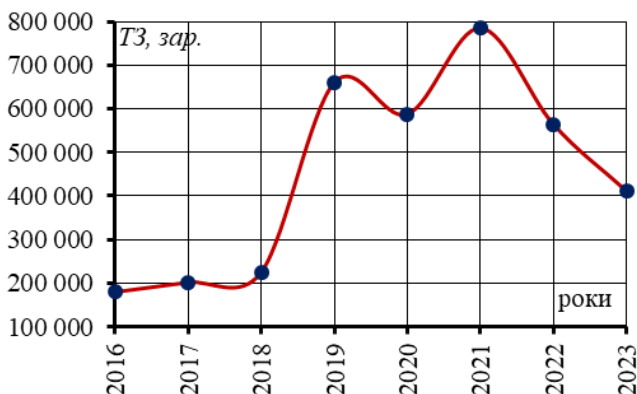
На другому етапі дослідження за статистичною інформацією державної служби статистики України, щодо викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, було проаналізовано динаміку зміни обсягів надходження діоксиду сірки в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення за 2016-2023 роки, що показано на рисунку 4. Тенденція зміни цих обсягів SO<sub>2</sub> представлена поліномом третього порядку (3), що з точністю R<sup>2</sup> = 0,9307 описує динаміку зміни цих обсягів. Середнє значення обсягів діоксиду сірки від пересувних джерел забруднення за вказаний період по Україні складає 17 070,9 т. на рік. Найбільші значення спостерігалися у 2019 та 2021 році, відповідно 19 803,2 т. та 19 643,3 т., а найменші у 2022 та 2023 роках, відповідно 14 143,2 т. та 10 324,5 т. Тенденція зміни обсягів SO<sub>2</sub> від пересувних джерел забруднення має спадний характер за останні два роки, в середньому на 27%, що обумовлено зменшенням загальної кількості транспортних засобів вперше зареєстрованого в Україні за вказані роки на 28% (рис. 5).

$$y_3(x) = -83.3 \cdot x^3 + 668 \cdot x^2 - 1017.2 \cdot x + 18105, \quad (3)$$

де  $x$  – роки,  $y_1(x)$  – обсяги SO<sub>2</sub> в тонах від пересувних джерел забруднення по Україні.

Хоча обсяги надходження діоксиду сірки від пересувних джерел забру-

днення складають лише 3-5% в порівнянні з обсягами від стаціонарних джерел, але ці викиди зосереджуються на рівні органів дихання людини, що негативно впливає на її здоров'я.



**Рисунок 5 – Динаміка зміни кількості зареєстрованих в Україні транспортних засобів за період 2016-2023 роки (Джерело: Автор)**

## Результати

Дослідження в даній роботі, дозволили отримано наступні результати:

1. Встановлено закономірності зміни обсягів надходження в атмосферне повітря діоксиду сірки від стаціонарних джерел забруднення за період 2016-2023 років. Тенденція зміни обсягів  $SO_2$  по Україні має спадний характер, хоча у 2023 році відбулося збільшення обсягів на 7,7% в порівнянні з 2022 роком. Тенденція зміни цих обсягів по Дніпропетровській області не має однозначного характеру. Так у 2023 році відбулося збільшення обсягів  $SO_2$  на 57,6% в порівнянні з 2022 роком, що перевищило показники 2017 та 2020 років.

2. Встановлено закономірності зміни обсягів надходження в атмосферне повітря діоксиду сірки від пересувних джерел забруднення за період 2016-2023 років. За останні два роки обсяги надходження  $SO_2$  від пересувних джерел забруднення зменшилися на 27% за рахунок зменшенням на 28% загальної кількості транспортних засобів вперше зареєстрованого в Україні за вказані роки.

## Висновки

Дане дослідження показує, що обсяги надходження  $SO_2$  від стаціонарних джерел є переважаючими над обсягами від пересувних джерел забруднення, тому необхідний постійний моніторинг якості повітря на території міста, де розміщується багато промислових підприємств. А також необхідні

стимулюючі дії зі сторони державних, регіональних та місцевих органів управління щодо зменшення викидів SO<sub>2</sub> від автомобільного транспорту, а особливо від транспорту, що працює на мазуті та дизельному паливі.

## Посилання

- Baldwin, N., Gilani, O., Raja, S., Batterman, S., Ganguly, R., Hopke, P., Berrocal, V., Robins, T., & Hoogterp, S. (2015). Factors affecting pollutant concentrations in the near-road environment. *Atmospheric Environment*, 115, 223–235. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.024>
- Commodore, S., Ferguson, P. L., Neelon, B., Newman, R., Grobman, W., Tita, A., Pearce, J., Bloom, M. S., Svendsen, E., Roberts, J., Skupski, D., Sciscione, A., Palomares, K., Miller, R., Wapner, R., Vena, J. E., & Hunt, K. J. (2020). Reported Neighborhood Traffic and the Odds of Asthma/Asthma-Like Symptoms: A Cross-Sectional Analysis of a Multi-Racial Cohort of Children. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(1), 243. <https://doi.org/10.3390/ijerph18010243>
- Hausfather, Z., & Forster, P. (2023). *Analysis: How low-sulphur shipping rules are affecting global warming*. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/analysis-how-low-sulphur-shipping-rules-are-affecting-global-warming/>
- Ipeaiyeda, A. R., & Adegboyega, D. A. (2017). Assessment of Air Pollutant Concentrations Near Major Roads in Residential, Commercial and Industrial Areas in Ibadan City, Nigeria. *Journal of Health and Pollution*, 7(13), 11–21. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-7-13.11>
- Kontovas, C. A. (2020). Integration of air quality and climate change policies in shipping: The case of sulphur emissions regulation. *Marine Policy*, 113, 103815. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103815>
- Samuels, G., & Freemark, Y. (2022). *The Polluted Life Near the Highway*. Urban Institute. <https://www.urban.org/sites/default/files/2022-11/The%20Polluted%20Life%20Near%20the%20Highway.pdf>
- Головне управління статистики у Дніпропетровській області. (2024). [dneprstat.gov.ua](http://www.dneprstat.gov.ua). Головне управління статистики у Дніпропетровській області. <http://www.dneprstat.gov.ua/statinfo/ns/>
- Держстат. (2023). *Набори даних. Державна служба статистики України*. [https://stat.gov.ua/index.php/uk/datasets?f\[0\]=ds\\_topics:188&f\[1\]=ds\\_topics:199](https://stat.gov.ua/index.php/uk/datasets?f[0]=ds_topics:188&f[1]=ds_topics:199)



# Challenges and Issues of Modern Science



**3**

**2024**