



SCIENTIFIC AND
PRACTICAL JOURNAL

ECONOMICS AND TECHNICAL ENGINEERING

Vol. 3 No. 1 (2025)

ete.org.ua





Vol. 3 No. 1 (2025)

Available since: 2023

Published: 2 times a year

Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

UDC: 33+62]:001.891/.895](051.034)=161.2=111

E-mail: ete@duet.edu.ua

Journal homepage: <https://ete.org.ua>

EDITORIAL TEAM

Editor-in-Chief:

Serhii HUSHKO, Prof. DSc, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Deputy Editor-in-Chief and Executive secretary:

Victoria SOLOVIEVA, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Technical editors:

Kira VYSHNEVSKA, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Olena HONCHARENKO, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Eduard MOKRIAK, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Editorial board:

George ABUSELIDZE, Prof. DSc, Shota Rustaveli State University (Georgia)

Iluta ARBIDANE, Prof. Dr.oec., Rezekne Academy of Technologies (Latvia)

Leonid BANNIKOV, DSc, Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry

Svitlana BOGUSLAVSKA, Prof. DSc, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy

Yevhen CHUPRYNOV, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Natalia DESNA, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Leonid DOLINSKYI, Prof. DSc, National University of Kyiv Mohyla Academy (Ukraine)

Vyacheslav GLUSHCHEVSKY, Prof. DSc, Zaporizhzhia National University (Ukraine)

Liliana HORAL, Prof. DSc, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ukraine)

Daria KASSIM, Prof. DSc, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Sergii ISKOV, Assoc. Prof. PhD, State University "Zhytomyr Polytechnic" (Ukraine)

Olena KRAVCHENKO, Assoc. Prof. PhD, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy

Andrii KRYVORUCHKO, Assoc. Prof. PhD, State University "Zhytomyr Polytechnic" (Ukraine)

Volodymyr KULISHOV, Prof. DSc, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Hanna KUCHEROVA, Prof. DSc, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Iryna MAKSIMOVA, Assoc. Prof. DSc, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Hanna MATUKOVA, Prof. DSc, Bogomolets National Medical University (Ukraine)

Yevhenii MODLO, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Iryna MURAVIOVA, DSc, Nekrasov Iron & Steel Institute of National Academy of Sciences of Ukraine

Olena NIEIZVIESTNA, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Dmytro POPOLOV, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Oleg PURSKY, Prof. DSc, State University Of Trade And Economics (Ukraine)

Michael RADIN, Assoc. Prof. PhD, Rochester Institute Of Technology (USA)

Kateryna SHMELTSE, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Rasa SUBAČIENĖ, Prof. PhD, Vilnius University (Lithuanian)

Oleksandr TEMCHENKO, Prof. DSc, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Oleksandr UCHYTEL, Prof. DSc, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Svitlana VASYLCHAK, Prof. DSc, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Iryna VASYLCHUK, Prof. DSc, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Olena VASYLYEVA, Prof. DSc, National University "Zaporizhzhia Polytechnic" (Ukraine)

Volodymyr ZASELSKYI, Prof. DSc, State University of Economics and Technology (Ukraine)

Recommended for publication by Academic Council University of Economics and Technology (Protocol N15 dated June 26, 2025)

Mailing address: Vyzvoleny Square, 2, Kryvyi Rih, Ukraine, 50005

Materials are published in the original language (Ukrainian or English).

Editorial office not always agrees with the authors.

Reprint of the publications is possible to carry out only for the agreement of editorial office





ECONOMIC
AND TECHNICAL
ENGINEERING

Науково-практичний журнал
"Economics and technical engineering"

Том 3 № 1 (2025)

Видається з 2023 року
Періодичність: 2 рази на рік

Засновник: Державний університет економіки і технологій
ISSN: 3041-1246

УДК: 33+62]:001.891/.895](051.034)=161.2=111

E-mail: ete@duet.edu.ua Сторінка журналу: <https://ete.org.ua>

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор:

Сергій ГУШКО, професор, д.е.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Заступник головного редактора і відповідальний секретар:

Вікторія СОЛОВІЙОВА, доцент, к.е.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Технічні редактори:

Кіра ВИШНЕВСЬКА, доцент, к.п.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Олена ГОНЧАРЕНКО, доцент, к.ф.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Едуард МОКРЯК, доцент, к.е.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Редакційна колегія:

Георгій АБУСЕЛІДЗЕ, доктор філософії, Державний університет ім. Шота Руставелі (Грузія)

Ілута АРБІДАНЕ, доктор філософії, Резекненська технологічна академія (Латвія)

Леонід БАННИКОВ, кандидат хімічних наук, Український державний науково-дослідний інститут карбохімії

Світлана БОГУСЛАВСЬКА, професор, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

Олена ВАСИЛЬЄВА, професор, д.е.н., Національний університет «Запорізька політехніка» (Україна)

Світлана ВАСИЛЬЧАК, професор, д.е.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Ірина ВАСИЛЬЧУК, професор, д.е.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

В'ячеслав ГЛУЩЕВСЬКИЙ, професор, Запорізький національний університет (Україна)

Ліліана ГОРАЛЬ, професор, д.е.н., Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (Україна)

Наталія ДЕСНА, доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Леонід ДОЛІНСЬКИЙ, професор, д.е.н., Національний університет «Києво-Могилянська Академія» (Україна)

Володимир ЗАСЕЛЬСЬКИЙ, професор, д.т.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Сергій ІСЬКОВ, доцент, к.т.н., Державний університет «Житомирська політехніка» (Україна)

Дар'я КАССИМ, професор, д.т.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Олена КРАВЧЕНКО, доцент, кандидат медичних наук, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького (Україна)

Андрій КРИВОРУЧКО, доцент, к.т.н., Державний університет «Житомирська політехніка» (Україна)

Володимир КУЛІШОВ, професор, д.п.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Ганна КУЧЕРОВА, професор, д.е.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Ірина МАКСИМОВА, доцент, д.е.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Ганна МАТУКОВА, доктор педагогічних наук, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця (Україна)

Євгеній МОДЛЮ, доцент, к.т.н., Державний університет економіки та технологій (Україна)

Ірина МУРАВЬОВА, д.т.н., Інститут чорної металургії ім. І.М. Некрасова НАН України (Україна)

Олена НЕІЗВЕСТНА, доцент, к.е.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Дмитро ПОПОЛОВ, доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Олег ПУРСЬКИЙ, професор, д.ф.м.н., Державний торговельно-економічний університет (Україна)

Михайло РАДІН, доктор філософії, Рочестерський технологічний інститут (США)

Раса СУБАЧІСНЕ, професор, доктор філософії, Вільнюський університет (Литва)

Олександр ТЕМЧЕНКО, професор, д.т.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Олександр УЧИТЕЛЬ, професор, д.т.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Катерина ШМЕЛЬЦЕР, доцент, к.т.н., Державний університет економіки та технологій (Україна)

Євген ЧУПРИНОВ, доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій (Україна)

Рекомендовано до друку Вченою радою Державного університету економіки і технологій (Протокол № 15 від 26.06.2025)

Поштова адреса: площа Визволення, 2, м. Кривий Ріг, Україна, 50005

Матеріали публікуються мовою оригіналу (українською або англійською).

Редакція не завжди погоджується з авторами.

Передрук публікацій можливий лише за згодою редакції



© Науково-практичний журнал "Economics and technical engineering, 2024
Статті в журналі публікуються під Creative Commons Attribution International BY.

CONTENTS

Economics

- 8 - 20** **EU Metrics for the Circular Economy in Light of Modern Business Practices**
Serhii Hushko, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksandr Bai, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 21 - 31** **Political and Socio-Economic Dimensions of Modern International Migration: The Case of Ukraine**
Iryna Yegorova, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Iryna Maksymova, Assoc. Prof., DSc, State University of Economics and Technology, Ukraine
Oleksandra Hrynko, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Kira Vyshnevskaya, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Volodymyr Kulishov, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 32 - 40** **Institutional mechanisms for regulating the logistics activities of enterprises**
Svitlana Vasylychak, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleh Podkopaiev, Acting Director of the Educational and Scientific Institute of Economics and Business Education, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Serhiy Karpyuk, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 41 - 53** **The IT market of Ukraine in times of war**
Igor Potyomkin, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Hanna Kucheroval, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 54 - 65** **GeoGebra with augmented reality as a tool for teaching mathematics in the training of specialists in the field of management and administration**
Olha Pylypenko, PhD, Separate structural unit "Professional College of Economics and Technology of State University of Economics and Technology", Kryvyi Rih, Ukraine
- 66 - 72** **Models of Transformation of Higher Education Institutions into Entrepreneurial Universities: Typology, Algorithm, and Strategic Management**
Oleksandr Olesnevych, Postgr., Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, Kyiv, Ukraine
- 73 - 84** **Business Efficiency within the Framework of the EU Single Market**
Iryna Maksymova, Assoc. Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Taras Bilyk, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

Technical engineering

- 85 - 94 Approaches to determining the theoretical combustion temperature of fuel in a blast furnace furnace when varying the parameters of the blowing mode**
Daria Kassim, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Yevhen Chuprynov, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Kateryna Shmeltser, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Iryna Liakhova, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Maryna Korenko, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 95 - 105 Laboratory studies on the effect of vibro-impact action of the screening surface on the main technological indicators of metallurgical raw material screening**
Dmytro Popolov, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Serhii Shved, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Hennadii Zaitsev, PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Serhii Henkulenko, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleh Shumylo, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 106 - 119 Peculiarities of application of lifting and loading equipment in changing conditions of mining production**
Dmytro Tereshko, Education seeker, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksandr Temchenko, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Pavlo Siedniev, Deputy Director for Production and Quality, Ukrtekhnoalliance LLC, Kryvyi Rih, Ukraine
Natalia Bahashova, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 120-133 Method for representing the electromechanical characteristics of an electric traction drive with sequentially excited DC motors**
Andrii Pyrozhenko, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Yevhenii Modlo, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Viacheslav Khyzhniak, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Yuliia Lytovchenko, Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksandr Lytovchenko, Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

ЗМІСТ

Економіка

- 8 - 20 Метрики циркулярної економіки ЄС в контексті сучасних бізнес-практик**
Serhii Hushko, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksandr Bai, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 21 - 31 Політичні та соціально-економічні аспекти сучасної міжнародної міграції: кейс Україна**
Iryna Yegorova, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Iryna Maksymova, Assoc. Prof., DSc, State University of Economics and Technology, Ukraine
Oleksandra Hryenko, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Kira Vyshnevskaya, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Volodymyr Kulishov, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 32 - 40 Інституціональні механізми регулювання логістичної діяльності підприємств**
Svitlana Vasylychak, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleh Podkopaiev, Acting Director of the Educational and Scientific Institute of Economics and Business Education, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Serhiy Karpyuk, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 41 - 53 ІТ-ринок України в умовах війни**
Igor Potyomkin, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Hanna Kucherova, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 54 - 65 GeoGebra з доповненою реальністю як інструмент навчання математики у підготовці фахівців галузі управління та адміністрування**
Olha Pylypenko, PhD, Separate structural unit "Professional College of Economics and Technology of State University of Economics and Technology", Kryvyi Rih, Ukraine
- 66 - 72 Моделі трансформації закладів вищої освіти у підприємницькі університети: типологія, алгоритм та стратегічне управління**
Oleksandr Olesnevych, Postgr., Kyiv national economic university named after Vadym Hetman, Kyiv, Ukraine
- 73 - 84 Ефективність бізнесу в умовах Єдиного ринку ЄС**
Iryna Maksymova, Assoc. Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Taras Bilyk, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

Технічна інженерія

- 85 - 94** **Підходи до визначення теоретичної температури згоряння палива в доменній печі при зміні параметрів режиму продувки**
Daria Kassim, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Yevhen Chuprynov, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Kateryna Shmeltser, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Iryna Liakhova, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Maryna Korenko, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 95 - 105** **Лабораторні дослідження технологічних параметрів грохочення металургійної сировини при вібраційно-ударної дії сіючої поверхні**
Dmytro Popolov, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Serhii Shved, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Hennadii Zaitsev, PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Serhii Henkulenko, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleh Shumylo, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 106 - 119** **Особливості застосування виймально-навантажувального устаткування в мінливих умовах гірничого виробництва**
Dmytro Tereshko, Education seeker, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksandr Temchenko, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Pavlo Siedniev, Deputy Director for Production and Quality, Ukrtekhnоalliance LLC, Kryvyi Rih, Ukraine
Natalia Bahashova, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 120 - 133** **Метод побудови електромеханічних характеристик тягового електропривода з двигунами постійного струму послідовного збудження**
Andrii Pyrozhenko, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Yevhenii Modlo, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Viacheslav Khyzhniak, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Yuliia Lytovchenko, Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksandr Lytovchenko, Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: ete@duet.edu.ua Journal homepage: <https://ete.org.ua>

JEL: Q56, M14, L21, O52

DOI: 10.62911/ete.2025.03.01.01

EU Metrics for the Circular Economy in Light of Modern Business Practices

Citation:

Hushko, S., Bai O. (2025). European Metrics for the Circular Economy in Light of Modern Business Practices. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". 3, 8-20. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.01.01>

Serhii Hushko

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: vice-rector@duet.edu.ua

 *ORCID iD: 0000-0002-4833-3694*

Oleksandr Bai

Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: bai_ov_23546@kneu.dp.ua

 *ORCID iD: 0009-0006-8003-8739*

Abstract: The study examines the current structure and methodological framework of circular economy metrics adopted in the European Union, emphasizing their relevance for modern business practices under the European Green Deal. In the context of growing resource constraints and regulatory pressure for sustainability, the research aims to critically assess the ability of the EU's circular economy indicators to reflect the complexity of economic, environmental, and behavioral transformation processes. The analysis is based on the updated Eurostat framework, which includes five thematic blocks and eleven key indicators. Special attention is paid to metrics on material consumption, waste generation, green public procurement, circular material use, and innovation activities. Using qualitative content analysis and cross-sectoral comparison, the study highlights gaps in digital integration, sectoral adaptation, and behavioural dimensions of circularity monitoring. The findings reveal substantial asymmetries in waste recycling rates, dependence on primary materials, and the share of secondary raw materials in supply chains. It is shown that while large enterprises more actively implement circular practices, SMEs face regulatory, technological, and financial barriers. Moreover, the lack of behavioural and digital indicators constrains the system's responsiveness to emerging business models such as «Product-as-a-Service» and sharing platforms. The paper concludes with suggestions for expanding the EU indicator framework to include metrics for digital traceability, consumption behaviour, and localized circular solutions. These improvements could enhance the practical value of circular monitoring tools for corporate sustainability strategies and cross-border policy harmonization. The study also raises the question of how circular metrics can better reflect the dynamics of global value chains and sustainability reporting standards. Integrating digital tools and behavioral data analytics is proposed as a crucial next step in advancing evidence-based policy and business decision-making.

Keywords: sustainable development; circular economy; EU indicators; waste management; business transformation; material efficiency; recycling; green public procurement; green economy; digitalization.



JEL: Q56, M14, L21, O52

EU Metrics for the Circular Economy in Light of Modern Business Practices

Serhii Hushko

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: vice-rector@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-4833-3694

Oleksandr Bai

Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: bai_ov_23546@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0009-0006-8003-8739

Abstract: The study examines the current structure and methodological framework of circular economy metrics adopted in the European Union, emphasizing their relevance for modern business practices under the European Green Deal. In the context of growing resource constraints and regulatory pressure for sustainability, the research aims to critically assess the ability of the EU's circular economy indicators to reflect the complexity of economic, environmental, and behavioral transformation processes. The analysis is based on the updated Eurostat framework, which includes five thematic blocks and eleven key indicators. Special attention is paid to metrics on material consumption, waste generation, green public procurement, circular material use, and innovation activities. Using qualitative content analysis and cross-sectoral comparison, the study highlights gaps in digital integration, sectoral adaptation, and behavioural dimensions of circularity monitoring. The findings reveal substantial asymmetries in waste recycling rates, dependence on primary materials, and the share of secondary raw materials in supply chains. It is shown that while large enterprises more actively implement circular practices, SMEs face regulatory, technological, and financial barriers. Moreover, the lack of behavioural and digital indicators constrains the system's responsiveness to emerging business models such as «Product-as-a-Service» and sharing platforms. The paper concludes with suggestions for expanding the EU indicator framework to include metrics for digital traceability, consumption behaviour, and localized circular solutions. These improvements could enhance the practical value of circular monitoring tools for corporate sustainability strategies and cross-border policy harmonization. The study also raises the question of how circular metrics can better reflect the dynamics of global value chains and sustainability reporting standards. Integrating digital tools and behavioral data analytics is proposed as a crucial next step in advancing evidence-based policy and business decision-making.

Keywords: sustainable development, circular economy; EU indicators; waste management; business transformation; material efficiency; recycling; green public procurement; green economy; digitalization.

Метрики циркулярної економіки ЄС в контексті сучасних бізнес-практик

Сергій Гушко

професор, доктор економічних наук, Державний університет економіки і технологій,

м. Кривий Ріг, Україна

e-mail: vice-rector@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-4833-3694

Олександр Бай

аспірант, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, Україна

Анотація: У статті досліджено сучасну структуру та методологічні засади системи метрик циркулярної економіки, впроваджені в ЄС, з акцентом на її релевантність до сучасних бізнес-практик у межах Європейського зеленого курсу. В умовах посилення ресурсних обмежень та регуляторного тиску на бізнес у напрямку зеленого переходу, метою дослідження є критичне оцінювання здатності системи індикаторів циркулярної економіки ЄС відображати складність економічних, екологічних та поведінкових трансформацій. Аналіз базується на оновленій статистичній рамці Євростату, яка включає п'ять тематичних блоків та одинадцять ключових показників. Особливу увагу приділено індикаторам споживання матеріалів, утворення відходів, зелених державних закупівель, частки вторинної сировини та інноваційної активності. На основі якісного контент-аналізу та міжсекторального порівняння виявлено прогалини у цифровій інтеграції, адаптації до потреб різних секторів та недостатнє охоплення поведінкових аспектів циркулярної економіки. Результати засвідчують суттєві асиметрії в рівнях переробки відходів, залежності від первинної сировини та частці вторинних ресурсів у ланцюгах постачання. Показано, що великі підприємства активніше впроваджують циркулярні практики, тоді як МСП стикаються з регуляторними, технологічними та фінансовими бар'єрами. Водночас відсутність цифрових та поведінкових індикаторів обмежує здатність системи реагувати на нові бізнес-моделі, зокрема «Product-as-a-Service». У підсумку запропоновано розширити систему метрик ЄС за рахунок індикаторів цифрової простежуваності, поведінки споживачів та локалізованих циркулярних рішень, що підвищить прикладну цінність моніторингу для корпоративних стратегій сталого розвитку та гармонізації політик на міжнародному рівні.

Ключові слова: сталий розвиток, циркулярна економіка; індикатори ЄС; управління відходами; трансформація бізнесу; матеріальна ефективність; переробка; зелені державні закупівлі; зелена економіка; диджиталізація.

Вступ (Introduction)

У сучасних умовах трансформації глобальної економіки з огляду на ресурсне виснаження, втрату біорізноманіття, деградацію довкілля та зміну клімату, концепція циркулярної економіки стає провідною парадигмою сталого розвитку. За оцінками Європейської Комісії, щороку в Європейському Союзі генерується понад 2,2 мільярда тонн відходів, а лише 12,8% вторинних матеріалів повертаються в економіку як сировина (*Eurostat, 2024*). У відповідь на ці виклики ЄС активно впроваджує політики, спрямовані на скорочення залежності від первинних ресурсів, підвищення ефективності використання матеріалів та подовження життєвого циклу продукції.

У цьому контексті особливого значення набуває формування цілісної та адаптивної системи моніторингу та оцінювання прогресу переходу до циркулярної економіки. У ЄС запроваджено офіційну систему показників циркулярної економіки, яка охоплює п'ять ключових блоків: виробництво та споживання; управління відходами; вторинні ресурси; конкурентоспроможність та інновації; а також глобальні аспекти циркулярності (*Eurostat, 2024*). Ця система не лише виконує функції статистичного інструментарію, але й підтримує політичне ухвалення рішень у межах Європейського зеленого курсу та Плану дій з циркулярної економіки. Зі свого боку, сучасне бізнес-середовище дедалі активніше інтегрує принципи циркулярності у виробничі стратегії, логістику, моделі споживання та звітність зі сталого розвитку. Дослідження Єврокомісії показують, що 57% великих компаній у ЄС уже впровадили хоча б один компонент циркулярного підходу, зокрема повторне використання матеріалів, екодизайн або моделі спільного користування (*European Commission, 2023*).

Це зумовлює потребу у критичному аналізі того, наскільки чинна система європейських метрик здатна повною мірою відображати складність та динаміку циркулярної трансформації, зокрема в бізнес-практиках, що швидко змінюються під тиском кліматичних викликів, цифровізації та нових регуляторних вимог.

Наукові дослідження останніх років все більше зосереджуються на оцінці ефективності та застосування метрик циркулярної економіки в Європейському Союзі, особливо в контексті сучасних бізнес-практик. Автори Шавкатов, Росса, Паула (*Shavkatov et al., 2024; Rosa & Paula, 2023*) показали, що запровадження циркулярних практик у виробничих компаніях ЄС позитивно впливає на фінансові результати: зростає прибутковість, ефективність та вартість бренду. Ефект був особливо помітний серед великих підприємств та компаній Північної Європи. Подібні висновки були зроблені іншими науковцями, які проаналізували вплив циркулярної економіки на малі та середні підприємства Європи. Так, у дослідженнях Паскаля, Горохової та ін. (*De Pascale et al., 2023; Gorokhova et al., 2023*) підкреслюється, що найпоширенішою стратегією в межах циркулярної економіки в ЄС є рециклінг. Було класифіковано чотири основні типи циркулярних бізнес-моделей: замкнений цикл, подовження терміну служби продукту, відновлення ресурсів і циркулярні ланцюги постачання. Однак, як показали у своїй роботі Балдассаре та Калабрет (*Baldassarre & Calabretta, 2023*), багато бізнес-моделей циркулярної економіки не вдається масштабувати через нормативні, культурні, економічні та технічні бар'єри. Водночас, Алівожводіч та Кокалідже (*Alivojvodic & Kokalj, 2024*) запропонували універсальний індекс CEIR, що включає всі 9R-стратегій і дозволяє порівнювати рівень циркулярності між галузями та країнами. Подібно, Морено та ін. (*Moreno et al., 2023*) розробили індекс CECI, який узагальнює прогрес країн ЄС у реалізації циркулярної економіки, а Шейх та ін. (*Shaikh et al., 2024*) доповнили цю дискусію дослідженням у сфері виробництва, де запропонували методологію оцінки циркулярності з використанням аналітичної ієрархії. Вони наголосили на важливості інтеграції метрик сталості у виробничі стратегії для підвищення ресурсоефективності. Варто зазначити роботу Максимової, Настасе (*Maksymova & Nastase, 2024*), які проаналізували вплив цифрової трансформації на зменшення вуглецевого сліду малих та середніх підприємств ЄС, які становлять значну частину споживання енергії в бізнес-секторі. Виявлено значну варіативність цих показників між країнами ЄС, а також розрив у готовності МСП у порівнянні з великими компаніями щодо впровадження кліматичних ініціатив та цифрових рішень. У підсумку, Тжелінська (*Trzcielinska, 2023*) довела, що ключовим чинником для успішного впровадження принципів циркулярної економіки є знання змін у бізнес-екосистемі. Компанії, які краще орієнтуються в регуляторних, ринкових та соціальних тенденціях, активніше реалізують циркулярні практики та розглядають їх як бізнес-можливість.

Враховуючи зазначене, метою статті є систематизація та критичне осмислення основних індикаторів циркулярної економіки, визначених на рівні Європейського Союзу, а також оцінка їхньої релевантності щодо сучасних практик ведення бізнесу в умовах зеленого переходу. Особливу увагу приділено аналізу структурної побудови показників, їх інформаційного навантаження та потенціалу для адаптації до змін у корпоративному управлінні та стратегіях сталого розвитку.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

У дослідженні застосовано комплексний методологічний підхід, що поєднує якісний аналіз, порівняльний огляд індикаторів та інтерпретативну структурну оцінку. Основою емпіричної бази виступила оновлена система моніторингу циркулярної економіки Європейського Союзу, розроблена Євростатом. Аналіз здійснювався у межах п'яти тематичних блоків: виробництво та споживання, управління відходами, вторинні сировинні матеріали, конкурентоспроможність та інновації, глобальна сталість і стійкість.

Методика дослідження передбачала реалізацію трьох ключових етапів.

На першому етапі було здійснено структурну декомпозицію індикаторної системи з метою виявлення економічних, екологічних та статистичних вимірів кожного показника. Це дозволило встановити логіку взаємозв'язків між кількісними метриками (наприклад,

споживання матеріалів, утворення відходів) та проксі-індикаторами політики (зокрема, обсяги зелених державних закупівель, патентна активність у сфері зелених інновацій).

На другому етапі застосовано метод порівняльного аналізу міжкраїнних відмінностей у динаміці індикаторів, особливо у сферах управління високоризиковими відходами (пластик, електроніка, побутові відходи). Первинні дані отримано з відкритих статистичних джерел Eurostat за 2022–2024 роки. Оцінювалися інституційні асиметрії у рівнях переробки та ступені залежності від первинних ресурсів.

На третьому етапі проведено критичну оцінку релевантності системи індикаторів до сучасних бізнес-практик.

Результати (Results)

В умовах реалізації Європейського зеленого курсу та трансформації виробничо-споживчої моделі на засадах сталого розвитку, постає нагальна потреба у формуванні ефективного інструментарію для моніторингу циркулярних змін. Саме з цією метою Європейським Союзом була оновлена система статистичних індикаторів циркулярної економіки, що дозволяє здійснювати всебічний аналіз прогресу у впровадженні відповідних політик на міжкраїновому рівні.

Згідно з методологією, оновленою у 2023 році, система моніторингу включає одинадцять ключових індикаторів, згрупованих у п'ять тематичних блоків: (1) виробництво та споживання, (2) управління відходами, (3) вторинні сировинні матеріали, (4) конкурентоспроможність та інновації, (5) глобальна сталість і стійкість (рис. 1).



Рисунок 1. Ключові групи метрик оцінки циркулярної економіки ЄС

Джерело: авторська розробка на основі структури Eurostat

Така структура забезпечує цілісне охоплення основних фаз економічного циклу та дозволяє простежити, наскільки ефективно європейська економіка адаптується до вимог циркулярності. Варто зазначити, що ця система є водночас аналітичним інструментом для

політиків, джерелом інформації для бізнесу, а також орієнтиром для країн-партнерів ЄС у процесі впровадження власних циркулярних стратегій (Eurostat, 2024).

Структура індикаторів враховує як кількісні, так і якісні виміри циркулярної трансформації. Зокрема, у фокусі перебувають не лише традиційні показники поводження з відходами, але й більш складні компоненти, як-от рівень використання вторинних ресурсів, частка циркулярного споживання матеріалів, обсяг інвестицій в екотехнології та поширення інноваційних бізнес-моделей. Це дозволяє побачити не просто технічну динаміку зменшення ресурсозалежності, а й зміни у поведінці споживачів, стратегіях підприємств і політичних пріоритетах. Такий підхід узгоджується з концепцією цілісної системної трансформації економіки та є основою для досягнення кліматичної нейтральності в довгостроковій перспективі.

Наступним важливим аспектом аналізу є змістовне наповнення окремих індикаторів, що вимагає детального розгляду кожного з тематичних блоків. З цією метою у подальшому дослідженні розглядаються основні показники, їхня динаміка, інтерпретаційні можливості та відповідність сучасним бізнес-практикам у країнах Європейського Союзу.

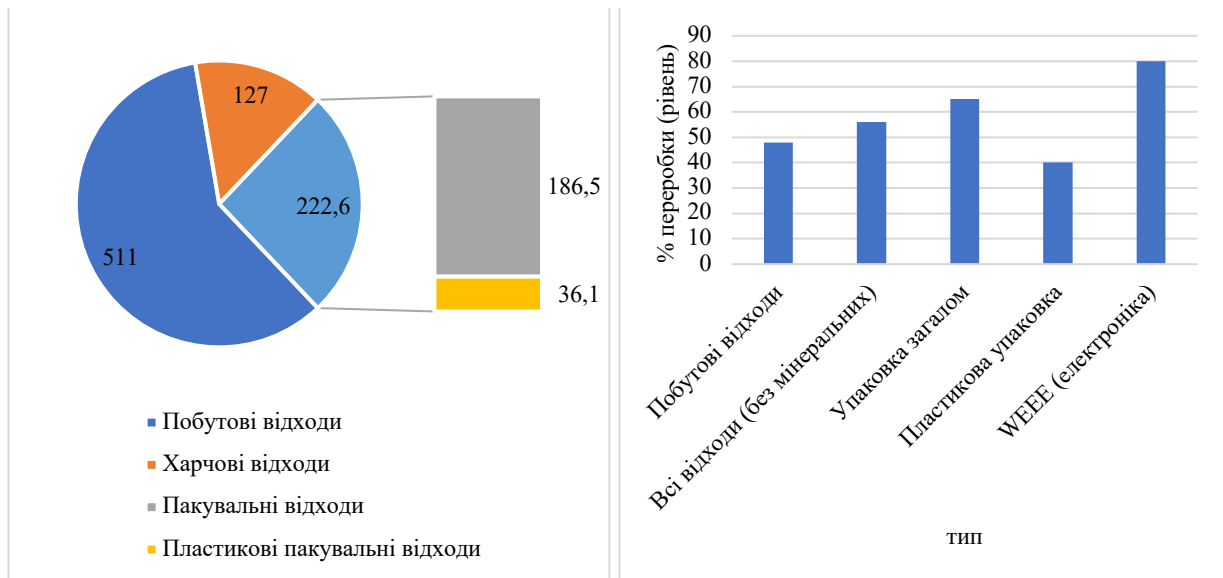
У межах напрямку «Виробництво та споживання» одним з ключових показників, що дозволяє оцінити ефективність ресурсного використання в економіці, є індикатор утворення відходів. Його висока інформативність пояснюється тим, що відходи, як продукт неефективного проєктування життєвого циклу товарів, становлять як екологічне, так і економічне навантаження на систему.

У межах цього блоку визначено три статистичні індикатори: споживання матеріалів (material consumption), зелені державні закупівлі (green public procurement) та утворення відходів (waste generation). Кожен із них виконує окрему діагностичну функцію в оцінці того, наскільки економіка віддаляється від лінійної моделі «взяти–виробити–викинути» та переходить до циркулярної парадигми.

Показник споживання матеріалів є базовим макроекономічним індикатором, який відображає загальну масу ресурсів, залучених в економіку. Зменшення цього показника свідчить про ефективніше використання сировини, підвищення рівня замкненості потоків матеріалів та розрив зв'язку між економічним зростанням і ресурсним навантаженням. У контексті циркулярної економіки ключовим викликом є досягнення декуплінгу — розриву прямої залежності між ВВП та обсягами матеріального споживання, що потребує як технологічних інновацій, так і змін у поведінці виробників і споживачів.

Другий індикатор — зелені державні закупівлі — відіграє стратегічну роль у формуванні попиту на екологічно сталу продукцію. Оскільки державний сектор формує значну частку внутрішнього попиту, орієнтація закупівель на екологічні критерії має мультиплікативний ефект для розвитку ринку циркулярних товарів та послуг. Це, своєю чергою, стимулює підприємства до впровадження принципів екодизайну, скорочення викидів, використання вторинної сировини та цифрового моніторингу екологічного сліду. Водночас залишається відкритим питання гармонізації підходів до оцінки та звітності в сфері зелених закупівель у різних країнах ЄС.

Третій індикатор — утворення відходів — є критично важливим з точки зору оцінки втрат на вході в економіку та неефективності споживання. У циркулярній економіці утворення відходів не розглядається лише як проблема утилізації, а як ознака нераціонального планування життєвого циклу продукції. Особливої уваги потребує структурний аналіз потоків відходів, зокрема харчових, пластикових, електронних та упаковки, адже саме ці категорії мають значний екологічний слід та вимагають спеціалізованих рішень.



а) Утворення відходів ЄС (кг на душу нас.)

б) Переробка

Рисунок 2. Метрики управління відходами в системі циркулярної економіки ЄС
Джерело: розраховано авторами на основі статистики Eurostat

Таким чином, кількісні показники утворення різних типів відходів (рис. 2а) свідчать про наявність глибоких дисбалансів між рівнем споживання та рівнем циркулярності. У науковому дискурсі активізуються дискусії щодо доцільності введення індикаторів ефективності поводження з відходами не лише у фізичному вимірі, але й з урахуванням економічної вартості втрат — наприклад, вуглецевого сліду, вартості невикористаних ресурсів, втраченої енергії тощо. Залишається актуальним і питання гармонізації даних між країнами-членами ЄС, оскільки відмінності в методологіях збору можуть ускладнювати порівняльний аналіз і стратегічне планування. Водночас постає дискусійне питання щодо необхідності деталізації деяких індикаторів (наприклад, розподілу за галузями, соціально-економічними групами або технологічними сегментами), щоб підвищити релевантність даних для бізнесу, інституцій та громадянського суспільства.

Побудована діаграма (рис. 2б) чітко демонструє нерівномірність рівнів переробки різних типів відходів у Європейському Союзі, що має вагоме значення для розуміння актуальних викликів у сфері управління ресурсами та для адаптації бізнес-практик до принципів циркулярної економіки. Найвищий рівень переробки зафіксовано для електронних відходів (WEEE), який нині році сягнув 80%, що свідчить про ефективність спеціалізованих каналів збору, розвинену інфраструктуру та високий економічний стимул до повернення критичних матеріалів. Цей показник підтверджує здатність бізнесу швидко адаптуватися до регуляторних вимог та інтегрувати цифрові рішення у логістику зворотного постачання, відстеження компонентів та автоматизовану сортувальну інфраструктуру.

Водночас, рівень переробки пластикової упаковки становить лише 40%, що вказує на структурні обмеження ринку переробки пластмас, труднощі з утилізацією композитних матеріалів, а також на недостатній вплив існуючих екологічних регуляторів на дизайн упаковки. Це відкриває простір для розвитку бізнес-практик з фокусом на екодизайн, використання біоальтернатив та моделі повторного використання, зокрема в торгівлі та харчовій промисловості. Так, переробка загального пакувального матеріалу досягла 65%, що вказує на позитивну динаміку впровадження розширеної відповідальності виробника у виробничих практиках. Компанії, які орієнтовані на сталу упаковку, отримують не лише екологічні, але й маркетингові переваги в умовах зростаючої екоосвідомості споживачів.

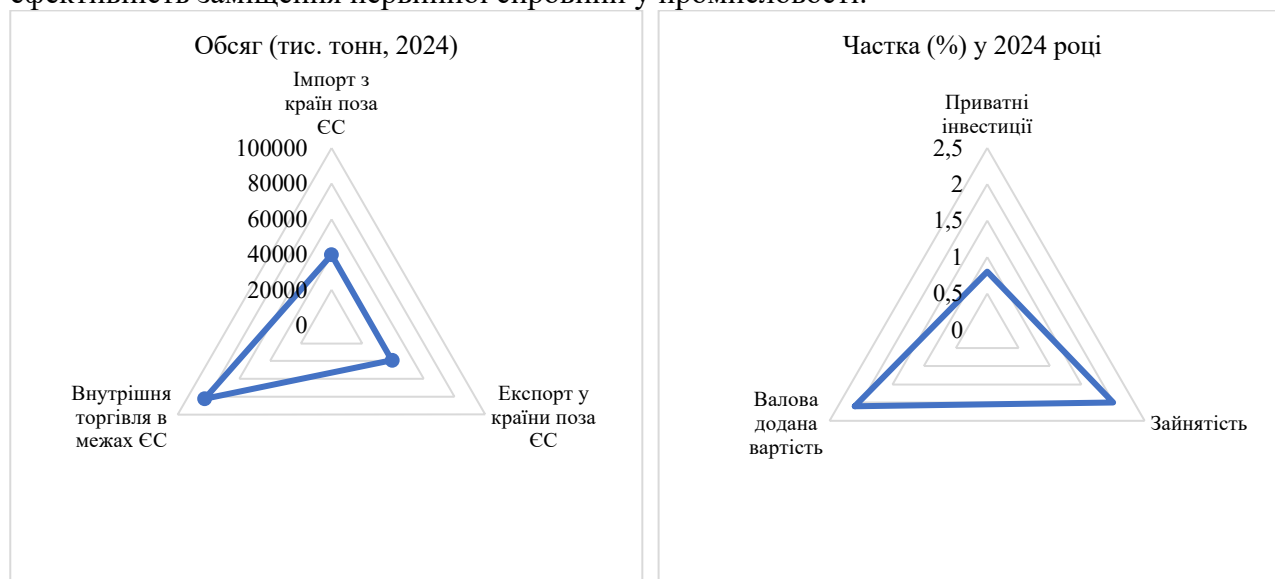
Середній рівень переробки усіх відходів, за винятком мінеральних, становить 56%, а побутових відходів 48%, що сигналізує про обмежену інтеграцію циркулярних підходів у щоденну поведінку населення та локальні бізнес-процеси. Це вказує на потребу у змінах у побутовому споживанні, бізнес-моделях B2C, а також у ширшому застосуванні цифрових технологій для сортування, моніторингу та стимулювання переробки.

Таким чином, дані графіка (рис. 2 а,б) підтверджують наявність системного розриву між рівнем нормативного забезпечення та реальними результатами переробки, особливо у сферах з високою часткою роздрібного споживання. Подолання цього розриву потребує від бізнесу трансформації стратегій сталого розвитку, інвестицій у циркулярні технології та активного залучення в партнерства з державним сектором задля впровадження рішень, заснованих на принципах «ресурсної ефективності» та «дизайну для переробки».

Зважаючи на ключову роль вторинної сировини у формуванні замкнених матеріальних циклів, попередній аналітичний блок дозволяє окреслити принципові підвалини циркулярної економіки — повернення ресурсів в економічний обіг та відновлення їхньої цінності через повторне використання і переробку.

Саме тому логічним продовженням є глибший розгляд наступного напрямку «Вторинні сировинні матеріали», який концентрує увагу на двох центральних індикаторах, що оцінюють реальний внесок перероблених ресурсів у загальну потребу економіки в сировині. Цей напрям включає, по-перше, внесок перероблених матеріалів у задоволення попиту на сировину, що вимірюється через такі підпоказники як частка циркулярного використання матеріалів (Circular Material Use Rate) та рівень переробки після закінчення життєвого циклу продукту (End-of-Life Recycling Rate). По-друге, торгівля перероблюваними сировинними матеріалами, яка відображає не лише економічну взаємодію між країнами ЄС та рештою світу, а й рівень інтеграції на внутрішньому ринку вторинних ресурсів, що є визначальним для стратегічної автономії.

Актуальність детального дослідження цього напрямку (рис. 3) посилюється на тлі глобального зростання конкуренції за ресурси, політичних ризиків імпорту стратегічної сировини та посилення вимог до декарбонізації ланцюгів постачання. У цьому контексті особливої уваги потребує не лише загальний рівень циркулярності економіки, але й якість торговельних потоків, географічна диверсифікація постачань вторинних матеріалів та ефективність заміщення первинної сировини у промисловості.



а) у натуральному вимірі

б) відсоткова структура

Рисунок 3. Показники вторинної сировини в країнах ЄС

Джерело: розраховано авторами на основі статистики Eurostat

Така структура свідчить про високий рівень інтеграції ринку вторинної сировини в межах ЄС, а також про зростаючу ресурсну взаємозалежність між країнами-членами.

Це відповідає стратегічній меті ЄС — зміцнення внутрішньої циркулярної економіки та зменшення залежності від імпорту критичних матеріалів. Перевага внутрішньої торгівлі також свідчить про розбудову ефективної логістики та стандартизованих потоків вторинних ресурсів, що є ключовим для досягнення автономності та стійкості матеріального циклу в межах Союзу.

У структурі європейської системи індикаторів циркулярної економіки інший напрям «Конкурентоспроможність та інновації» виконує ключову функцію вимірювання довгострокового потенціалу циркулярної моделі як джерела економічного зростання, структурної перебудови та глобальної конкурентної переваги. Цей блок передбачає оцінювання двох статистичних індикаторів: обсягу приватних інвестицій, зайнятості та валової доданої вартості у циркулярних секторах, а також кількості патентів, пов'язаних з переробкою та вторинною сировиною.

Перший індикатор відіграє роль агрегованого вимірника економічної активності у сферах, безпосередньо пов'язаних з циркулярною економікою: переробка, ремонт, повторне використання, сектор екодизайну, логістика зворотного постачання. Його динаміка є свідченням того, наскільки структурно трансформується ринок праці та фінансові потоки в умовах переходу до сталих моделей виробництва і споживання. Зокрема, зростання інвестицій у зазначені сектори корелює з підвищенням продуктивності ресурсів та зниженням залежності економіки від імпорту первинної сировини. Водночас це сприяє утворенню зелених робочих місць та підвищенню соціальної інклюзії у трансформаційних процесах.

Другий індикатор — патентна активність у сфері циркулярних технологій — слугує проксі-метрикою інноваційного потенціалу. Він дозволяє оцінити рівень технологічної зрілості відповідних рішень та швидкість їхнього впровадження в економіку. Інновації охоплюють не лише технології переробки та заміщення матеріалів, а й нові форми організації виробничих процесів (наприклад, індустріальна симбіозність), цифрові інструменти для відстеження матеріалів у ланцюгах постачання, а також моделі спільного споживання та сервісної економіки. Таким чином, індикатор інновацій тісно пов'язаний з оновленням продуктового дизайну, покращенням ремонтпридатності, модульності, довговічності та функціональної адаптивності продукції.

На макрорівні розвиток цього напрямку корелює з цілями Європейського зеленого курсу, а також з політиками стратегічної автономії ЄС. Стимулювання інноваційної активності в циркулярній економіці сприяє скороченню технологічних розривів між країнами-членами, підвищенню конкурентоспроможності європейських виробників, а також забезпечує економічну основу для реалізації цілей кліматичної нейтральності.

Таким чином, напрям «Конкурентоспроможність та інновації» в системі моніторингу циркулярної економіки відображає не лише прогрес у сфері ресурсного використання, але й глибину інституційних перетворень. Його значення полягає в тому, що він не лише фіксує результати змін, а й вказує на довгострокову стійкість і динамічність циркулярного переходу, що здійснюється через інвестиційні потоки, трансформацію ринку праці та інноваційні розробки, інтегровані у нові бізнес-моделі.

П'ятий напрям системи моніторингу циркулярної економіки Європейського Союзу «Глобальна сталість і стійкість» має ключове значення для оцінки трансформаційної здатності циркулярних практик в умовах глобальної взаємозалежності та ресурсної вразливості. Він виходить за межі суто національних або секторальних підходів і охоплює макропоказники, що відображають внесок циркулярної економіки у досягнення цілей кліматичної нейтральності, безпеки постачання сировини та зменшення матеріальної залежності ЄС.

Цей напрям охоплює:

1. глобальну сталість циркулярної економіки;
2. стійкість циркулярної економіки.

У межах глобальної сталості вимірюється екологічний слід споживання (consumption footprint), який оцінює ступінь відповідності використання ресурсів планетарним межам, а

також викиди парникових газів у виробничій діяльності, що дозволяє визначити внесок циркулярної економіки у досягнення кліматичної нейтральності.

Ці субіндикатори відображають два взаємозалежні аспекти. З одного боку, споживчий тиск на природне середовище, а з іншого — здатність економіки трансформувати структуру викидів шляхом скорочення первинного споживання, використання повторних матеріалів та підвищення ефективності виробничих процесів. У цьому контексті циркулярна економіка розглядається не лише як технологічна модель, але й як механізм зниження глобальних екологічних зовнішніх ефектів.

Другий інтегральний індикатор «стійкість» оцінює здатність ЄС зменшувати критичну залежність від імпорту ресурсів та забезпечувати стратегічну автономію у постачанні сировини. Тут застосовуються два підпоказники:

1. рівень залежності від імпорту матеріалів;
2. самозабезпеченість обраними видами сировини для виробництва в ЄС.

Водночас, уміння зменшити зовнішню сировинну вразливість через локалізацію потоків вторинної сировини, оптимізацію внутрішньої логістики та формування міжгалузевих замкнених циклів розглядається як критичний чинник економічної стійкості в умовах геополітичної нестабільності та зростання конкуренції за ресурси.

З огляду на це, напрям «глобальна сталість і стійкість» поєднує екологічну складову (через вплив на викиди та слід споживання) з економічною (через управління залежністю від ресурсів).

Таблиця 1. Складові глобальної сталості та стійкості в оцінці циркулярної економіки ЄС

Індикатор	Значення (2024)	Динаміка за останні 5 років	Вплив в контексті циркулярних бізнес-практик
Екологічний слід споживання (індекс, 2010=100)	109	+3 пункти	Підвищення індексу свідчить про збереження високого рівня ресурсного навантаження; вимагає масштабування практик екодизайну, локального виробництва та економіки спільного користування.
Викиди парникових газів у виробничій сфері (кг на особу)	5963	-420 кг на особу	Скорочення викидів демонструє ефективність інноваційних рішень у виробництві, впровадження енергоефективних технологій та поступове зниження залежності від викопного палива.
Залежність від імпорту матеріалів (%)	22	-1.5%	Зниження імпортової залежності свідчить про розвиток локального ринку вторинної сировини, а також успішну інтеграцію стратегій переробки та повторного використання ресурсів у бізнес-практики.
Самозабезпеченість ЄС алюмінієм (%)	11	+2.1%	Зростання самозабезпечення алюмінієм підтверджує здатність бізнесу формувати замкнені матеріальні потоки, що зменшує стратегічні ризики та сприяє автономності постачання.

Джерело: побудовано авторами

Таким чином, п'ятий блок метрик уможливорює оцінку того, наскільки циркулярна економіка виконує не лише функцію «внутрішнього очищення» системи споживання і виробництва, а й посилює гео економічну позицію ЄС як глобального гравця з низьким екологічним ризиком, високою матеріальною самодостатністю та стабільним функціонуванням у довгостроковій перспективі.

Резюмуючи викладене вище зазначимо, що система індикаторів циркулярної економіки, розроблена Євростатом, охоплює п'ять міжвзаємопов'язаних напрямів: виробництво та споживання, управління відходами, вторинні сировинні матеріали, конкурентоспроможність та інновації, глобальна сталість і стійкість. Така структура формує основу для інтегрального моніторингу циркулярної трансформації на макроекономічному рівні. Кожен із напрямів фіксує певний аспект переходу від лінійної моделі до ресурсно-ефективної та відновлювальної економіки.

Сильні сторони цієї системи полягають у її балансі між екологічними, економічними та інноваційними вимірами, що дозволяє відстежувати не лише потоки матеріалів, а й структурні

зміни у бізнес-середовищі, рівень інституційної зрілості економіки та здатність до кліматичної нейтральності. Зокрема, поєднання традиційних матеріальних показників (DMC, CMU, recycling rate) із індикаторами зайнятості, інвестицій, патентної активності й гео економічної автономії дозволяє говорити про методологічну цілісність обраної рамки.

Водночас, актуальною залишається проблема обмеженої адаптивності цієї системи до країн, що розвиваються або перебувають у перехідному стані. По-перше, значна частина індикаторів прив'язана до наявності надійних статистичних джерел, які в багатьох країнах відсутні або мають низький ступінь деталізації. По-друге, фокус на патентній активності, зелених інвестиціях та інфраструктурі повторного використання передбачає наявність зрілої інноваційної екосистеми — компоненту, що ще формується у багатьох державах поза ЄС.

Крім того, деякі напрями потребують більшої динамічності та цифрової інтеграції. Зокрема, блок «виробництво та споживання» не охоплює такі сучасні тренди, як цифрова паспортизація продукції, системи прозорості ланцюгів постачання та циркулярні бізнес-моделі на основі платформ PaaS (Product-as-a-Service - продукт як послуга). Це обмежує глибину аналітичного покриття впливу цифрових технологій на впровадження циркулярних практик та зелений перехід у цілому.

Також потенційно корисним є введення поведінкових індикаторів циркулярної економіки, що відображають зміну споживчих патернів, рівень екологічної свідомості, інституційної підтримки циркулярних ініціатив на місцевому рівні. У довгостроковій перспективі це дозволить відстежувати не лише техніко-економічні параметри, а й соціокультурні зрушення, які є не менш важливими для досягнення сталого переходу.

Позитивною особливістю рамки ЄС є її відкритість до оновлень, адже розглянута система індикаторів уже проходила етапи ревізії та розширення, що свідчить про її гнучкість. Проте в умовах глобальної циркулярної координації варто забезпечити механізми порівняння та узгодження з іншими системами оцінки, зокрема міжнародних інституцій ОЕСР та UNEP. Це дасть змогу забезпечити методологічну уніфікацію на рівні міжнародних звітів та сприятиме синергії політик у контексті Цілей сталого розвитку.

Висновки (Conclusions)

Система індикаторів, запропонована Європейською комісією, охоплює ключові ланки циркулярної економіки, що дозволяє комплексно оцінювати ресурсну ефективність та екологічну сталість господарської діяльності. Для бізнесу це формує орієнтири вимірювання прогресу у впровадженні моделей замкненого циклу, включно з екодизайном, модульністю продукції, довготривалим використанням та повторним залученням матеріалів у виробничі процеси.

Поступове впровадження циркулярних підходів у виробничі та управлінські практики свідчить про зростання ролі відповідального бізнесу в екологічній трансформації. Водночас наявні статистичні розриви між секторами вказують на нерівномірність готовності компаній до переходу: малі та середні підприємства часто стикаються з бар'єрами щодо доступу до еко технологій і фінансування, тоді як великі корпорації демонструють вищу динаміку адаптації.

Водночас, відсутність цифрових метрик у наявній системі моніторингу обмежує можливості для інтеграції бізнес-практик, орієнтованих на Smart Circular Solutions — цифрові платформи перерозподілу ресурсів, електронні сертифікати походження, цифрові паспорти продукції тощо. Це стримує розвиток інноваційних бізнес-моделей, де автоматизація та штучний інтелект сприяють мінімізації відходів та оптимізації ланцюгів постачання.

Рівень переробки різних типів відходів демонструє технологічні та організаційні виклики для бізнесу. Наприклад, низькі показники обробки пластику або органічних відходів вимагають не лише оновлення виробничих ліній, а й стратегічних рішень щодо зміни постачальницької бази, впровадження біорозкладних матеріалів, зокрема упакування. Це вимагає глибшої бізнес-рефлексії та адаптації корпоративної політики до нових екологічних стандартів.

Макроекономічна частка циркулярних секторів у структурі ВВП, зайнятості та інвестицій поки що залишається невисокою, що демонструє потенціал для подальшого масштабування. Для компаній це означає наявність ще неосвоєних ринкових ніш, зокрема у сферах сервісу ремонту, апсайклінгу, оренди, відновлення техніки, а також розширення бізнес-моделей PaaS «продукт як послуга».

Попри універсальність логіки побудови, система індикаторів недостатньо гнучка для адаптації в умовах країн з перехідною економікою. Для бізнесу в таких країнах ключовими стають спрощені або локалізовані моделі оцінювання циркулярності, що враховують обмеженість даних, відмінності в регуляторному середовищі та потребу в поетапному впровадженні практик сталого управління ресурсами.

Недостатнє врахування соціально-поведінкових вимірів у моніторингу звужує розуміння того, як бізнес трансформує споживчі моделі та залучає клієнтів до замкненого циклу. Інтеграція метрик екологічної культури, індексів готовності до спільного споживання чи рівня екосвідомості клієнтів дозволила б компаніям краще сегментувати ринок, розвивати нові продукти та формувати довготривалі відносини зі споживачами.

Активна позиція бізнесу в циркулярному переході підтверджується зростанням кількості корпоративних стратегій сталого розвитку, добровільної звітності за ESG-індикаторами, інвестицій у повторне використання матеріалів і утворення циркулярних кластерів. Це посилює потребу в оновленні системи метрик, які повинні не лише відображати державну політику, а й фіксувати динаміку приватних ініціатив, що формують нові правила гри на ринку.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримувало зовнішнього фінансування

Authors contribution

Концептуалізація, Г.С.; методика, Г.С.; формальний аналіз, Г.С. та Б.О.; аналітичні дані, Б.О.; візуалізація, Б.О., перевірка та редагування, Г.С. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Alivojvodic, V., & Kokalj, F. (2024). Drivers and barriers for the adoption of circular economy principles towards efficient resource utilisation. *Sustainability*, 16(3), 1317. <https://doi.org/10.3390/su16031317>
- Baldassarre, B., & Calabretta, G. (2024). Why circular business models fail and what to do about it: A preliminary framework and lessons learned from a case in the European Union (Eu). *Circular Economy and Sustainability*, 4(1), 123-148. <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00279-w>
- De Pascale, A., Di Vita, G., Giannetto, C., Ioppolo, G., Lanfranchi, M., Limosani, M., & Szopik-Depczyńska, K. (2023). The circular economy implementation at the European Union level. Past, present and future. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138658. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138658>
- European Commission. (2023). Progress Report on the Circular Economy Action Plan. Brussels: EC Publications.
- Eurostat. (2024). Circular economy – overview and indicators. Retrieved from: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/overview>
- Gorokhova, T., Shpatakova, O., Toponar, O., Zolotarova, O., & Pavliuk, S. (2023). CIRCULAR ECONOMY AS AN ALTERNATIVE TO THE TRADITIONAL LINEAR ECONOMY: CASE

- STUDY OF THE EU. *Environmental & Social Management Journal/Revista de Gestão Social e Ambiental*, 17(5). DOI 10.24857/rgsa.v17n5-002
- Maksymova, I., & Nastase, C. (2024). European model of climate-neutral business development based on digitalization principles. *Journal of European Economy*, 23(2), 336-352. <https://doi.org/10.35774/jee2024.02.336>
- Moreno, M. M. M., Esquinas, E. M. B., Yñiguez, R., & Puig-Cabrera, M. (2023). A global and comparative assessment of the level of economic circularity in the EU. *Journal of Cleaner Production*, 425, 138759.
- Rosa, B. O., & Paula, F. D. O. (2023). Circular economy adoption by European small and medium-sized enterprises: influence on firm performance. *Revista Brasileira de Gestão de Negócios*, 25, 421-438. <https://doi.org/10.7819/rbgn.v25i3.4232>
- Shaikh, M. B. N., Ali, M., Chaudry, U. M., & Khan, M. K. (2024). Metrics for sustainability and circular economy practices in context to modern manufacturing environment. *Circular Economy and Sustainability*, 4(3), 2073-2091. <https://doi.org/10.1007/s43615-024-00395-1>
- Shavkatov, N., Abdurakhimova, D., Sherkuziyeva, N., Omonov, S., & Rakhmedova, M. (2024). Circular economy practices and their effect on corporate financial performance. *Economic Annals-XXI*. <https://doi.org/10.21003/ea.V207-01>
- Trzcielińska, J., & Kaps, R. (2023, September). Knowledge of the Business Ecosystem and the Implementation of a Circular Economy. In *ECKM 2023 24th European Conference on Knowledge Management Vol 2*. Academic Conferences and publishing limited.
- Wandl, A., Dąbrowski, M., Berruti, G., Acke, A., Obersteg, A., Varjú, V., & Kowalczyk, M. (2023). A holistic self-assessment tool for circular economy transitions in cities and regions. *Europa XXI*, 44, 15-35. DOI 10.7163/EU21.2023.44.10



JEL: F50, F22, O15, J61

DOI: 10.62911/ete.2025.03.01.02

Political and Socio-Economic Dimensions of Modern International Migration: The Case of Ukraine

Citation:

Yegorova I., Maksymova I., Hrynko O., Vyshnevskaya K., & Kulishov V. (2025). Political and Socio-Economic Dimensions of Modern International Migration: The Case of Ukraine. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol.3 No.1 (2025), 21-31. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.01.02>

Iryna Yegorova

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: yegorova_ig@duet.edu.ua

ORCID ID: 0000-0002-7800-2810

Iryna Maksymova

Assoc. Prof., DSc, State University of Economics and Technology, Ukraine

e-mail: maksymova_ii@duet.edu.ua

ORCID ID: 0000-0001-9754-0414

Oleksandra Hrynko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: grynko_oi@duet.edu.ua

ORCID ID: 0000-0003-2413-4110

Kira Vyshnevskaya

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: vyshnevskaya_kg@duet.edu.ua

ORCID ID: 0000-0002-1882-6033

Volodymyr Kulishov

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: kulishov_vv@duet.edu.ua

ORCID ID: 0000-0002-8527-9746

Abstract: The article is devoted to the study of current trends in the field of international migration processes and how the socio-economic phenomenon that acquires new dimensions and becomes one of the key factors influencing the economy, business, labor market and social status of migrants. The article provides a theoretical and methodological substantiation of the essence and socio-economic paradigm of modern international migration, which affects donor countries, recipient countries, labor markets, demographic shifts, entrepreneurship and business in connection with geopolitical challenges, namely, political instability, military conflicts, social problems and environmental crises. A study of the impact of Ukrainian migrants on the host countries economies was conducted, which shows positive macroeconomic indicators of GDP on labor market conditions in the absence of a universal system of regulation of migration processes of states and especially illegal migration; analytical information on the return of Ukrainian immigrants, the impact of international migration processes in the context of war and labor migration on Ukrainian companies, businesses and their challenges, including working hours, workload. Despite the negative and positive aspects of the spread of international labor migration, the authors propose to implement, through the development of effective strategies, the main ways of reforming international labor migration, taking into account the post-war development of the country. It is concluded that the issue of international migration is a multilateral, complex and controversial phenomenon that requires further research and allows for the determination of their priorities in the future. In general, the cases reviewed show international migration, labor migration in particular, as an integral part of the globalized world playing an important role in shaping political, socio-economic and cultural processes in the context of the latest geopolitical challenges.

Keywords: migration, international labor migration, entrepreneurship, global business, labor market, migration policy, donor countries, recipient countries



JEL: F50, F22, O15, J61

Political and Socio-Economic Dimensions of Modern International Migration: The Case of Ukraine

Iryna Yegorova

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: yegorova_ig@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-7800-2810

Iryna Maksymova

Assoc. Prof., DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: maksimova_ii@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-9754-0414

Oleksandra Hrynko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: grynko_oi@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-2413-4110

Kira Vyshnevskya

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: vyshnevskya_kg@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-1882-6033

Volodymyr Kulishov

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: kulishov_vv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8527-9746

Abstract: The article is devoted to the study of current trends in the field of international migration processes and how the socio-economic phenomenon that acquires new dimensions and becomes one of the key factors influencing the economy, business, labor market and social status of migrants. The article provides a theoretical and methodological substantiation of the essence and socio-economic paradigm of modern international migration, which affects donor countries, recipient countries, labor markets, demographic shifts, entrepreneurship and business in connection with geopolitical challenges, namely, political instability, military conflicts, social problems and environmental crises. A study of the impact of Ukrainian migrants on the host countries economies was conducted, which shows positive macroeconomic indicators of GDP on labor market conditions in the absence of a universal system of regulation of migration processes of states and especially illegal migration; analytical information on the return of Ukrainian immigrants, the impact of international migration processes in the context of war and labor migration on Ukrainian companies, businesses and their challenges, including working hours, workload. Despite the negative and positive aspects of the spread of international labor migration, the authors propose to implement, through the development of effective strategies, the main ways of reforming international labor migration, taking into account the post-war development of the country. It is concluded that the issue of international migration is a multilateral, complex and controversial phenomenon that requires further research and allows for the determination of their priorities in the future. In general, the cases reviewed show international migration, labor migration in particular, as an integral part of the globalized world playing an important role in shaping political, socio-economic and cultural processes in the context of the latest geopolitical challenges.

Keywords: migration, international labor migration, entrepreneurship, business, labor market, migration policy, donor countries, recipient countries.

Introduction

Contemporary international migration is an integral part of the modern globalized world, playing a vital role in shaping socio-economic, political, and cultural processes. The growing scale of migration flows and their multifaceted impact on donor countries, recipient countries, and the global economy are further intensified by challenges such as political instability, armed conflicts, and environmental crises, all of which significantly influence the intensity and direction of migration. The issue of international migration processes is particularly relevant in the context of global changes in the world economy, the rising influence of transnational corporations, the formation of new labor markets, and demographic shifts. Understanding the interconnection between migration trends and business is especially important, as these factors affect the economic development of countries, the availability of skilled labor, and innovation potential (*Kulishov et al., 2024*).

The characteristics of labor migration in conditions of geopolitical instability and wartime in Ukraine have created a number of challenges and obstacles in managing migration flows in the labor market, economic impacts on entrepreneurship, and the socio-economic development of countries. Consequently, issues of migration policy are becoming increasingly relevant and require in-depth research, aimed at deepening our understanding of society's social dynamics under the influence of recent geopolitical challenges.

Materials and Methods

In the course of conducting this research and writing the article, various sources of information were used, including the scientific works of leading domestic and international scholars focused on the essence, features, policies, and socio-economic paradigms of modern international migration. The methodology included comparative analysis, empirical methods such as statistical data processing, and expert assessment methods used to identify current problems and challenges in international migration policy amid geopolitical upheavals. Additionally, methods of analysis and synthesis were applied to explore the theoretical foundations of international labor migration policy and integrate them into the context of their impact on the labor market, entrepreneurship, business, and the socio-economic development of countries.

Results

International migration encompasses various categories of individuals, such as economic migrants, refugees, political asylum seekers, students, family members, and others. As a phenomenon, it represents a crucial component of the modern globalized world and significantly influences the economy, sociocultural dynamics, political structures, and other spheres of life in both host and origin countries (*Chernobay et al., 2023*).

Migration can be temporary or permanent, occur through multiple channels, and carry diverse social, economic, and political consequences for both sending and receiving states. This process not only fosters cultural diversity but also makes a substantial contribution to the development and evolution of societies and economies at the international level.

The objects and subjects of international migration can be analyzed from various perspectives depending on the context and scope of the research. Taking into account the multidimensional nature of migration, Table 1 outlines the main objects and subjects of this phenomenon.

The main drivers of international labor migration are unsatisfactory economic conditions faced by the working-age population in emigration countries. These include, among other issues, low wages, unemployment, poor living standards, and widespread poverty.

In the case of Ukraine, the issue of migration and its impact on the country's economic state and human resource management in business is critically important, as it directly affects the future of

the country's post-war recovery. Gradus Research, a research company, conducted surveys in 2022 and 2023 on behalf of the Kyiv International Economic Forum among Ukrainians who emigrated abroad after the beginning of the full-scale invasion, as well as among the business community.

Table 1. Objects and Subjects of International Migration

Objects	Subjects
People. The primary object of migration is individuals relocating from one country or region to another.	Migrants. Individuals who physically move from one location to another.
Families. Migration may affect family structures and cohesion, facilitating the relocation of entire families or specific family members for reunification purposes.	Receiving countries. States that receive migrants and where they plan to reside or work.
Migrant groups. These may include communities sharing cultural, religious, or social characteristics, migrating together based on shared motivations.	Sending countries. States from which migrants depart for various reasons (economic, political, social, etc.).
Migration flows. The large-scale movement of people from one region or country to another, which can be seasonal, temporary, or permanent.	International organizations. Such entities as the United Nations or the International Organization for Migration, operating in the sphere of migration policy and the protection of migrants' rights.
	Social and non-profit organizations. Non-governmental and charitable institutions providing migrants with adaptation support, guidance, and services.

Source: developed by the authors based on FitzGerald, 2022.

According to nearly half of the respondents (45%), the main reason for leaving the country during the full-scale war was the safety and well-being of their families. Most respondents relocated to Poland (29%), Lithuania (16%), and Germany (10%). Nearly two-thirds (62%) reported that they were able to adapt fully or relatively quickly to life in the host country. The most frequently mentioned adaptation challenges included the local language (40%), financial difficulties (28%), and housing issues (24%) (Fig 1).

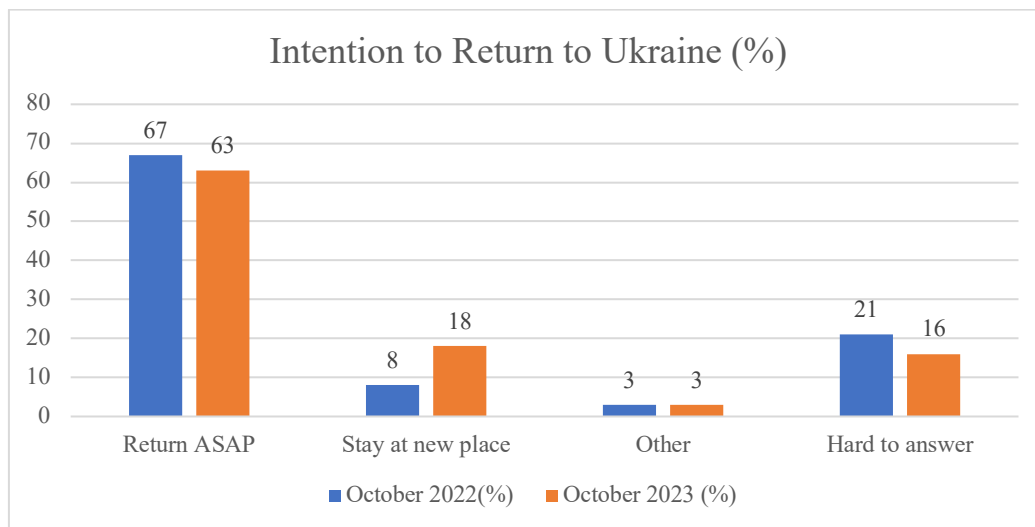


Figure 1. Survey on the Intention to Return to Ukraine

Source: Compiled by the authors based on Gradus Research data, 2023.

The survey results on employment indicate a high level of engagement among Ukrainian immigrants. Among Ukrainians who emigrated since the beginning of the war, 70% are employed: 54% work in the host country, 12% work remotely for Ukrainian companies, and 4% work remotely for foreign companies. The main barrier to employment mentioned by respondents is the language barrier.

Regarding Ukrainian businesses during wartime and under the influence of labor migration, it is noted that two-thirds (66%) of Ukrainian companies continue to operate as they did before the war, while the remaining third (34%) operate partially. Notably, there has been a significant increase in the share of businesses that have undergone, or require, partial or full sectoral transformation. As of October 2023, this figure stands at 59% (Fig 2).

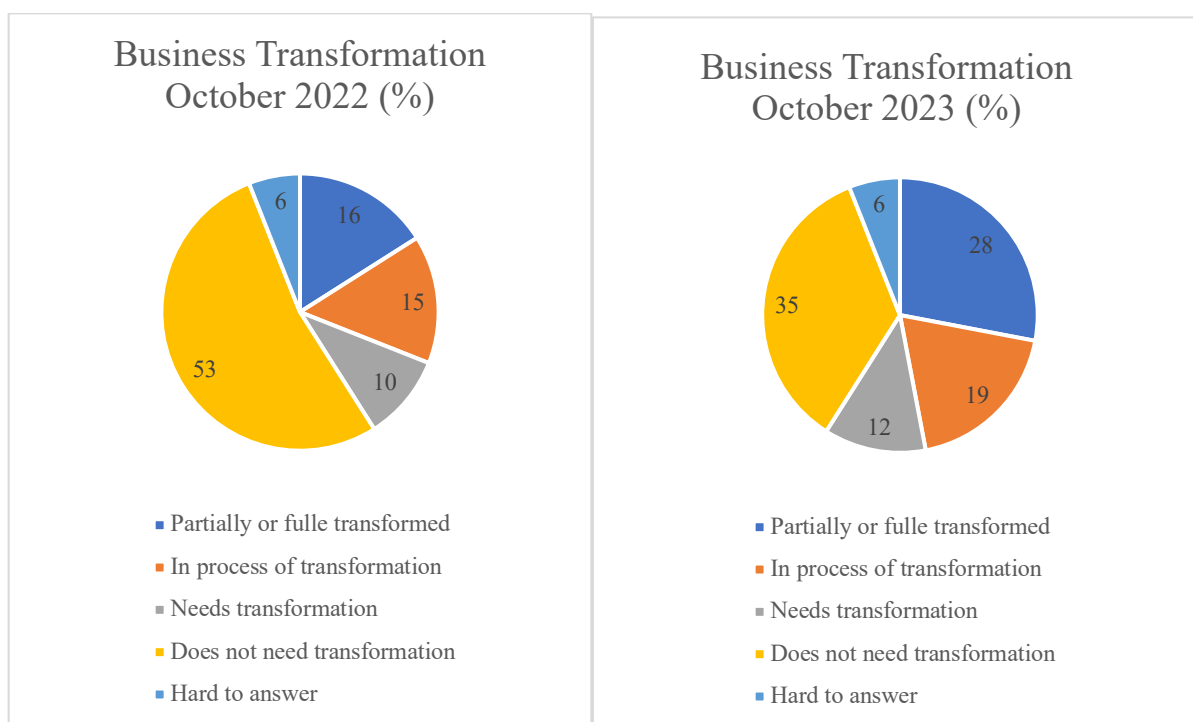


Figure 2. Sectoral Transformation of Ukrainian Businesses

Source: Compiled by the authors based on Gradus Research data, 2023.

In terms of business workload, over a quarter of surveyed companies (26%) report being 100% or more operational, while half (52%) are operating at more than 50% of their capacity. Furthermore, three-quarters (76%) report that their average monthly income has been maintained during the full-scale war period.

However, according to the business community survey, only a quarter (24%) of the companies report a shortage of personnel. The key challenges identified by businesses during the war include maintaining salary payments (44%), retaining markets and customers (41%), and ensuring business continuity during power outages (43%) (Fig 3).

“The results of the study suggest that the current stage of Ukrainian migration abroad, driven by the full-scale Russian invasion, is starting to have a tangible impact on the functioning of Ukrainian companies. Businesses see the issue of labor shortages as a key future risk and expect the government to be proactive and solve the problem through tackling corruption, supporting entrepreneurship, and creating new job opportunities,” - Yevheniia Blyzniuk, sociologist and founder of Gradus Research, comments (Gradus Research, 2023). Thus, the horizon of businesses planning during wartime has significantly shortened. Most companies (71%) plan no more than one year ahead. Nevertheless, more than half (53%) are optimistic and include active or moderate growth strategies in their planning. The primary risk cited by companies is employee mobilization (39%). To counteract potential human capital challenges, businesses plan to attract new employees within Ukraine (41%), enable remote

work (34%), and offer competitive financial conditions (32%).

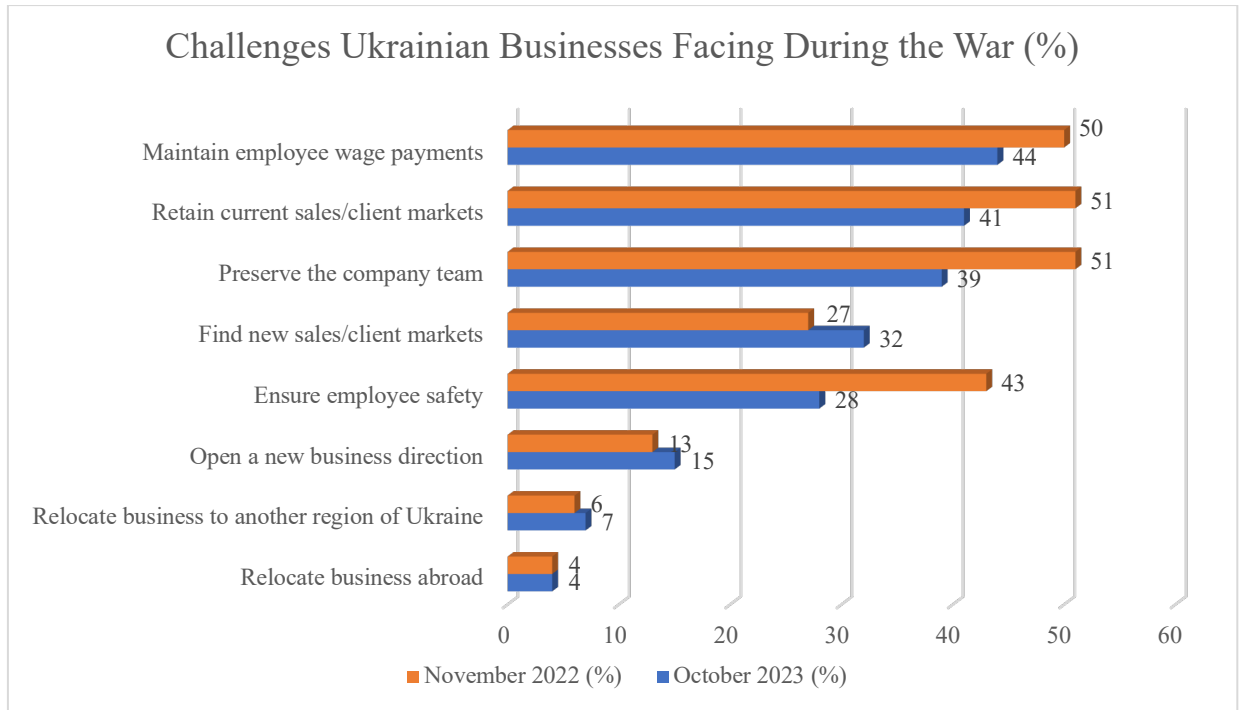


Figure 3. Challenges Ukrainian Businesses Facing During the War

Source: Compiled by the authors based on Gradus Research data, 2023.

Therefore, migration processes bring both positive and negative socio-economic consequences for donor and recipient countries. They promote economic growth, cultural exchange, and labor market expansion, but also introduce challenges such as social tension, inequality, and demographic imbalances. Effective migration governance is critical to balancing the interests of all parties and ensuring sustainable development in the face of modern geopolitical challenges (*Hushko et al., 2021*).

The consequences of war for international labor migration are complex and multifaceted. It is crucial to regulate and foster cooperation between countries, institutions, and organizations to uphold the rights of immigrants and address humanitarian issues. Moreover, the type of conflict significantly influences migration patterns—violent or occupation-based conflicts often result in large numbers of forced migrants, creating serious challenges for domestic security, asylum systems, and economic stability in host countries. On the other hand, war may also increase labor demand in sectors such as defense, reconstruction, and infrastructure recovery, which can attract migrants with relevant skills and experience.

In general, the impact of war on international labor migration is a multifaceted and contradictory phenomenon that requires in-depth research. Scholars, policymakers, and civil service organizations must dedicate efforts to studying the causes, effects, and strategies for managing migration during armed conflicts in order to protect civilians and stabilize both host countries and countries of origin (*Pavlov, 2022; Gorny, 2024*).

Besides, the research shows that Ukrainian immigrants have a positive effect on host economies. A study by Melnik & Gubitsky (2022) revealed that from 2013 to 2018, the average annual increase in Poland's labor force due to Ukrainian immigration was 0.8%, contributing approximately 0.5% to Ukraine's GDP. Based on OECD projections, Ukrainian immigrants are expected to positively impact other European economies as well. For example, the projected annual GDP growth contribution is estimated at 1.2% for countries like the Czech Republic, Poland, and Estonia, and 0.8% for Latvia and Hungary. However, these estimates may be understated due to the forced nature of recent migration and the resulting demographic shift in 2022, which can hinder integration (Fig 4).

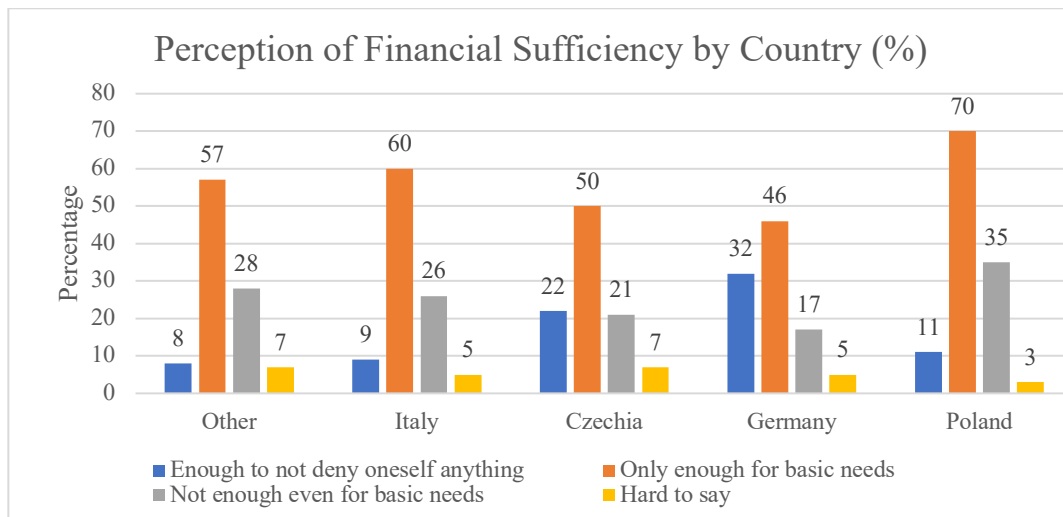


Figure 4. Living conditions of Ukrainian migrants.

Source: compiled by the authors based on open data (Statista, 2023)

The forecasts of Oxford Economics adopt a more conservative approach (Oxford Economics, 2022). For instance, if 650,000 Ukrainian immigrants remain in Poland, the labor force will increase by an additional 210,000 (1.2%) by 2030, and the potential GDP will grow by 1.2% compared to the baseline scenario of Oxford Economics. Should 1 million people migrate to the country, the labor force would expand by 370,000 (2.1%), while the total potential GDP would rise by 2.0% by 2030. Ultimately (by 2050), the positive effect will intensify, with the potential GDP increasing by 1.7% under the second scenario (+2.5% under the scenario of 1 million migrants).

The Deloitte report also notes that the integration of internally displaced Ukrainians in Poland may lead to an annual GDP growth of 0.2–3.5 percent during the first five years (Deloitte & UNHCR, 2023). This will depend on the quality of Poland's integration strategy, particularly its labor market flexibility and ability to address housing challenges.

Research conducted by Kancs and Lecca forecasts that an inflow of approximately 2.3 million immigrants into the EU by 2040 would raise the region's GDP by an average of 1.3%, assuming full integration of all immigrants (Kancs, 2018). Additionally, the long-term fiscal benefits of migration are expected to outweigh the short-term costs associated with welfare, language training, education, and employment.

These studies, thus, confirm the positive impact of Ukrainian immigrants on the economies of host countries through increased private consumption and overall GDP growth. While estimates vary depending on the assumptions and calculation models used, the economic influence of Ukrainian immigrants across recipient countries is generally positive.

IMF study from 2020 estimates that, all other factors being equal, the output of goods and services in the Czech Republic, Poland, and Estonia will be 2.2–2.3% higher than in the baseline scenario without migration, due to the contribution of Ukrainian migrants (Bayer, 2022). In Germany, France, and the United Kingdom, production of goods and services in 2026 is projected to be 0.6–0.65% higher than in a no-migration baseline scenario, attributable to the impact of Ukrainian immigration. UN survey data indicate that 87% of forcibly displaced persons are women with children. The proportion of migrants aged 18–59, Ukraine's fertility rate (1.2 children per woman), and the assumption that 70% of workers remain employed throughout the observed period were all taken into account.

Despite the favorable effects of migration, there are also certain aspects associated with it. For example, the spending of Ukrainian immigrants has become an additional factor contributing to inflation in European Union countries. In 2022, energy prices rose significantly, leading to a new era of record-high costs. In Lithuania, Estonia, Latvia, and Hungary, inflation exceeded 20% year-over-year (Van Tubergen et al., 2024). In the Czech Republic and Poland, inflation reached around 18%.

Additionally, the presence of Ukrainian immigrants also influenced the real estate markets in host countries.

As a result, while the migration of Ukrainian citizens brings benefits, it is important to account for potential negative consequences, including demographic shifts, high inflation, rising housing prices in some receiving countries, and especially the impact of political and environmental factors on modern migration (*Tucha et al., 2022*). These two factors—political and environmental—often interact, triggering waves of migration involving millions of people.

Thus, it can be argued that political and environmental factors are key driving forces of contemporary migration. Armed conflicts, political persecution, and environmental crises force millions of people to leave their homes in search of safety and better living conditions. These processes call for a global approach, in particular, cooperation among international organizations, governments, and civil society to address the root causes of migration and to provide humanitarian support to those affected (*Kamardina et al, 2024*).

As practice shows, there is no universal system for regulating migration processes globally, and each state adopts its own approach to this issue. Nevertheless, three major challenges concern many countries:

- first, the reception of refugees in countries involved in armed conflicts. War and conflict are primary causes of mass migration, as people seek safety and asylum. This situation poses a range of challenges for host countries, including the provision of adequate assistance and the integration of refugees into local communities;

- second, the eradication of human trafficking, which remains a serious problem and negatively impacts the rights and dignity of individuals. This criminal activity results in exploitation, sexual violence, forced labor, and other forms of human rights violations. International coordination and cooperation are crucial in addressing this issue;

- third, the regulation of temporary labor migration. The growing number of workers seeking opportunities abroad has raised concerns about their rights and working conditions. A key task is to develop mechanisms that ensure fair and effective systems for temporary employment.

Ukraine's state migration policy up to 2025 has been oriented toward increasing the migration of Ukrainian citizens for employment abroad, particularly in neighboring border regions. This migration typically takes the form of seasonal labor migration, which is cyclical by nature, though it may also lead to a shift from temporary to permanent migration—especially to more distant countries. Labor migration is the largest form of migration and affects the Ukrainian population across many domains. On one hand, it provides a source of income for foreign states, while the transfer of knowledge and experience can alleviate pressure on the domestic labor market, improve the welfare of many families, and contribute to national development. However, in certain regions, labor shortages have emerged, negatively affecting family relationships and the country's demographic situation. Migrants' consumption-driven incomes can also lead to increased expenditures, inflation, and income disparities (*Cabinet of Ministers of Ukraine, 2017*).

Consequently, it is important to note that, as the significance of international migration grows, the role of international organizations (both governmental and non-governmental) in regulating these processes is also expanding. This is reflected in the growth and diversification of the activities of international organizations with general jurisdiction, as well as in the establishment of specialized organizations focused on migration issues.

In this regard, the Ukrainian government must urgently undertake migration reform, drawing upon international experience and proposals for the implementation of social standards in the country. The primary goal of this reform is to facilitate the return of labor migrants and internally displaced persons fleeing conflict by ensuring their security and improving living conditions.

Moreover, the issue of illegal migration has become more acute due to war and conflict. Many people affected by such circumstances attempt to cross borders without proper documentation or take dangerous routes involving smugglers and illicit organizations. This situation poses security risks, undermines migration control, and increases the potential for illegal employment practices (*Gremi Personal, 2020*).

Despite both the positive and negative aspects of migration, the spread of international labor migration during wartime must be approached with careful consideration and implemented through effective strategies which include ensuring the safety and protection of the rights of displaced persons; securing access to essential services such as healthcare, education, and housing; providing protection from exploitation or violence; the creation of international institutions that support immigrant rights.

In order to achieve long-term development during periods of conflict, efforts must be focused on integrating immigrants into new countries. It includes providing opportunities for education and professional development, which allow immigrants to thrive and contribute to the economic growth of their host nations.

At the same time, support and reintegration programs aimed at facilitating the return of displaced persons to their local communities are crucial for fostering positive social reintegration.

Finally, the international community must strive to create mechanisms for conflict resolution, war prevention, and peacebuilding in affected regions, as these are key to reducing migration volumes and promoting sustainable development (Nikitina *et al.*, 2020; Rybchak *et al.*, 2024; Atamaniuk *et al.*, 2024).

Furthermore, future considerations regarding international labor migration in the context of war require awareness of the following key aspects:

- *humanitarian aid and regional development*: national and international humanitarian organizations must continue their efforts in conflict zones, providing assistance and essential services to those in need. At the same time, greater attention should be given to the development of vulnerable regions, with the goal of reducing population outflows and fostering the conditions necessary for the growth of the local economy;
- *development of comprehensive policies*: host countries must design and implement policies that effectively promote the integration, adaptation, and assimilation of migrants;
- *restructuring and expansion of labor markets*: labor market systems need to be adjusted and expanded to absorb new workforce segments and ensure fair employment opportunities;
- *information campaigns and education*: educational and awareness-raising campaigns play a crucial role in increasing public understanding of labor migration during wartime. Advocacy and international cooperation should aim to disseminate objective information about the causes of migration and the value migrants bring to both developing and host countries;
- *investment in development*: to improve the prospects of migrants both in host countries and in their countries of origin, it is vital to invest in the development of economic and social infrastructure. This includes support for infrastructure projects, small and medium-sized enterprises, education and vocational training, and the creation of sustainable conditions that reduce the need for migration and generate new opportunities within local regions.

Conclusions

The peculiarities of international migration—and labor migration in particular—in Ukraine during the war have become an extremely relevant issue today. Due to military conflicts and geopolitical instability, many Ukrainians are forced to leave their homeland in search of protection and employment abroad.

International labor migration is substantial and carries significant consequences for both host countries and the region as a whole. Its impact is multifaceted and complex, requiring coordinated efforts by states, organizations, and civil society to implement appropriate regulatory measures and ensure the protection of migrants' rights, as well as to address emerging humanitarian crises.

In this context, the Government of Ukraine must enhance its migration reform by taking into account international consensus and recommendations regarding the implementation of social standards. The principal objective of this reform is to facilitate the return of labor migrants and displaced persons who have fled the conflict by ensuring their safety and improving the population's quality of life. However, the success of such reforms will depend on the resolution of the conflict and the potential long-term consequences it may entail.

A particularly important issue is the economic integration of immigrants. International labor migration introduces new labor force into host societies, which can intensify tensions and competition between local populations and newcomers. Migrants frequently face difficulties with employment and lack adequate social protection, which can provoke negative attitudes toward them and escalate social tensions.

In summary, the growing scale of international labor migration necessitates a comprehensive and cooperative international approach. It requires effective governance, the safeguarding of human rights, and the development of measures aimed at addressing the root causes of conflict. Delivering humanitarian aid and security to displaced persons, regulating migration processes, preventing conflicts, eliminating underlying causes, fostering social empathy and tolerance, promoting public awareness and education, protecting the rights of displaced individuals, and allocating resources toward development—all constitute essential components for improving the conditions and outcomes of labor migration during wartime. The successful integration of refugees, along with the prevention of humanitarian crises, contributes to stability and development in both conflict-affected regions and host countries. Overall, the cases examined demonstrate a broader trend: international migration—and labor migration in particular—is an integral feature of a globalized world and plays a crucial role in shaping political, socioeconomic, and cultural processes in the face of emerging geopolitical challenges.

Further analysis of the social and professional trajectories of Ukrainian labor migrants in host countries remains highly relevant, as does the examination of the impact of large-scale migration on Ukraine's demographic resilience and labor market. Equally important is the development of reintegration strategies for returnees. A promising avenue for future research lies in the interdisciplinary exploration of the interconnections between migration, security risks, and economic recovery in the context of a protracted war. A key limitation of the present study is the predominantly qualitative nature of its generalizations and the absence of recent empirical data, which stems from restricted access to comprehensive official statistics during martial law. Consequently, future authors' research will be focus on the quantitative analysis of migration flows, the assessment of state policy effectiveness in the areas of migration and integration, and the study of transnational support networks for Ukrainian migrants across various global regions.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Funding

This study received no external funding.

Authors contribution

Conceptualization: M.I. and E.I.; Methodology: K.V.; Formal analysis: M.I. and E.I.; Visualization: G.O.; Revision and editing: K.V. and V.K. All authors have read and agreed with the published version of the manuscript.

References

- Atamaniuk, R., Klymenko, I., Melnychuk, L., Kravets, I., & Yarmak, T. (2024). The impact of mass migration on the demographic situation and the labor market in Ukraine. *Multidisciplinary Reviews*, 7(10). <https://10.31893/multirev.2024196>
- Bayer, C., & Shiamptanis, C. (2022). *How Ukrainian migrants affect the economies of European countries*. VoxEU.org. <https://cepr.org/voxeu/columns/how-ukrainian-migrants-affect-economies-european-countries>

- Cabinet of Ministers of Ukraine (2017). On approval of the Strategy of State Migration Policy of Ukraine for the period up to 2025: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine; Strategy of 12.07.2017 № 482. [Electronic resource]: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/482-2017-%D1%80#n10>.
- Chernobay, L., Malibroda, S., & Shevchuk, Yu. (2023). The impact of international migration on the economy of developing countries. *Economic Annals-XXI*, 205(9-10), 4-13. doi: <https://doi.org/10.21003/ea.V205-01>
- Deloitte & UNHCR. (2023). *Analysis of the impact of refugees from Ukraine on the economy of Poland*. Deloitte.
- FitzGerald, D. S. (2022). The sociology of international migration. In *Migration theory* (pp. 160-193). Routledge.
- Górny, A., & van der Zwan, R. (2024). Mobility and labor market trajectories of Ukrainian migrants to Poland in the context of the 2014 Russian invasion of Ukraine. *European Societies*, 26(2), 438-468. <https://doi.org/10.1080/14616696.2023.2298425>
- Gradus Research Company (2023). Open reports and data. URL: <https://gradus.app/uk/open-reports/>
- Gremi Personal. (2020). Analitichnyi zvit za pidsumkamy opytuvannia hromadian Ukrainy, yaki pratsiuut v Polshchi [Analytical report on the results of a survey of Ukrainian citizens working in Poland]. Retrieved from <https://gremi-personal.com.ua/backend/wp-content/uploads/2021/03/analitichnij-zvit.pdf>
- Hushko, S., Kulishov, V., Hangoni, T., Puriy, H., Kuzyšin, B., & Šip, M. (2021). Global Work Mobility in the Integration Conditions. *Quality-Access to Success*, 22 (183), p. 72-78.
- Kamardina, Y., Bozhko, D., Kyslyyova, K., Alimenko, O. M., & Pershyna, K. (2024). Exploring Legal Dynamics in Contemporary Migration with a Focus on Refugee and Migrant Rights. *Futurity Economics&Law*, 4(2), 200-213. <https://doi.org/10.57125/FEL.2024.06.25.11>
- Kancs, D., & Lecca, P. (2018). *Long-term social, economic and fiscal effects of immigration into the EU: The role of the integration policy*. *The World Economy*, 41(10), 2599–2630. <https://doi.org/10.1111/twec.12637>
- Kulishov, V. et al. (2024). *Global Economy: Evolution, Transformations, Challenges: Textbook*, 465 p.
- Melnik, G. M., & Gubitsky, L. V. (2022). Labor migration of ukrainians to the Republic of Poland 2014-2022. *European Historical Studies*, (23), 44-56.
- Nikitina A.V., Tskhovrebova E.N. (2020) Work migration of the labor force: problems and ways of solving emigration in Ukraine. *Market infrastructure*. № 43. C. 72-77. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/bitstream/>
- Oxford Economics. (2022). *Refugees in Poland will lift economy's potential, but challenges remain*. Retrieved from Oxford Economics report.
- Pavlov, O. (2022). International Labor Migration During the Russian War against Ukraine. *Black Sea Economic Studies*, 75, 80-86. DOI: <https://doi.org/10.32843/bses.75-13>
- Rybchak, V., Verniuk, N., Novak, I., & Fernos, Y. (2024). Study of the Impact of War Migration of the Population on the Ukrainian and European Labour Market. *Folia Oeconomica Stetinensia*, 24(1), 163-181.
- Statista (2023). Number of refugees from Ukraine crossing Central and Eastern European borders of Russia's invasion of Ukraine from February 24 to May 19, 2022, by selected country. [Electronic resource]. Access: <https://www.statista.com/statistics/1293403/cee-ukrainian-refugees-by-country>
- Tucha, O. (2022). Impact of Ukrainian migrants on the economies of recipient countries: a study / O. Tucha, I. Spivak, O. Bondarenko, O. Pogarska. National Bank of Ukraine. 31.12.2022. [Electronic resource]. Access mode: https://bank.gov.ua/admin_uploads/article/Migration_impact_2022-12-15.pdf
- Van Tubergen, F., Kogan, I., Kosyakova, Y., & Pötzschke, S. (2024). Self-selection of Ukrainian refugees and displaced persons in Europe. *Journal of Refugee Studies*, 37(1), 72-96. <https://doi.org/10.1093/jrs/fead089>



JEL: D11, D22, D23

DOI: 10.62911/ete.2025.03.01.03

Institutional mechanisms for regulating the logistics activities of enterprises

Citation:

Vasylchak, S., Podkopaiev, O., & Karpyuk S. (2025). Institutional mechanisms for regulating the logistics activities of enterprises. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol. 3 No. 1 (2025), 32-40. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.01.03>

Svitlana Vasylchak

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
e-mail: ysv123@i.ua

 ORCID ID: 0000-0001-9757-1683

Oleh Podkopaiev

Acting Director of the Educational and Scientific Institute of Economics and Business Education, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: podkopaiev_om_23825@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0000-8104-1549

Serhiy Karpyuk

Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
e-mail: karpyuk-sergey@ukr.net

 ORCID ID: 0009-0002-0526-8498

Received: 28/05/2025

Accepted: 04/06/2025



Abstract: The subject of the study is theoretical and methodological approaches to the formation of the structure of the institutional mechanism for regulating the logistics activities of enterprises. The purpose of the study is to identify the structural components of the regulatory mechanism that ensure the management of the logistics activities of enterprises, summarize their content, weight and tasks in a complex system. The components of the organizational structure of the mechanism for regulating the logistics activities of enterprises are determined by elements. The study was conducted using a combination of methods: general methods - generalization, abstraction, system-structural, special methods of economic and statistical analysis: comparative analysis to assess the dynamics of changes in the volume of sales of products by industrial enterprises of Ukraine. The scientific basis for the study is the publications of international scientists and researchers on the management of the logistics activities of the enterprise, materials of scientific and practical seminars, symposiums and conferences, legislative and regulatory documents of Ukraine, as well as statistical data of market entities. Based on the methods of comparison and analysis, an assessment of the dynamics of changes in the volume of sales of products by industrial enterprises of Ukraine is carried out. Structural and institutional mechanisms that ensure the process of managing the logistics activities of enterprises by components. The components of the organizational structure of the enterprise's logistics management are determined, their goals and objectives are characterized, which is the basis for the formation of a comprehensive integrated system of organizational support for the mechanism for regulating the enterprise's logistics activities. It is justified that the optimal combination and mutual coordination of structural components will allow for a successful management policy of logistics processes.

Keywords: enterprise, logistics activities, institutional mechanisms, structural components, logistics system

JEL: D11, D22, D23

Institutional mechanisms for regulating the logistics activities of enterprises

Svitlana Vasylichak

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: vsv123@i.ua

 ORCID ID: 0000-0001-9757-1683

Oleh Podkopaiev

Acting Director of the Educational and Scientific Institute of Economics and Business Education,
State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: podkopaiev_om_23825@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0000-8104-1549

Serhiy Karpyuk

Postgraduate, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: karpuk-sergey@ukr.net

 ORCID ID: 0009-0002-0526-8498

Abstract: The subject of the study is theoretical and methodological approaches to the formation of the structure of the institutional mechanism for regulating the logistics activities of enterprises. The purpose of the study is to identify the structural components of the regulatory mechanism that ensure the management of the logistics activities of enterprises, summarize their content, weight and tasks in a complex system. The components of the organizational structure of the mechanism for regulating the logistics activities of enterprises are determined by elements. The scientific basis for the study is the publications of international scientists and researchers on the management of the logistics activities of the enterprise, materials of scientific and practical seminars, symposiums and conferences, legislative and regulatory documents of Ukraine, as well as statistical data of market entities. Based on the methods of comparison and analysis, an assessment of the dynamics of changes in the volume of sales of products by industrial enterprises of Ukraine is carried out. Structural and institutional mechanisms that ensure the process of managing the logistics activities of enterprises by components. The components of the organizational structure of the enterprise's logistics management are determined, their goals and objectives are characterized, which is the basis for the formation of a comprehensive integrated system of organizational support for the mechanism for regulating the enterprise's logistics activities. It is justified that the optimal combination and mutual coordination of structural components will allow for a successful management policy of logistics processes.

Keywords: enterprise, logistics activities, institutional mechanisms, structural components, logistics system

Інституціональні механізми регулювання логістичної діяльності підприємств

Світлана Васильчак

проф., д.т.н, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: vsv123@i.ua

 ORCID ID:

ORCID ID: 0000-0001-9757-1683

Олег Подкопасьв

В.о. директора Навчально-наукового інституту економіки та бізнес-освіти, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: podkopaiev_om_23825@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0000-8104-1549

Сергій Карпук

аспірант, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: karpuk-sergey@ukr.net

 ORCID ID: 0009-0002-0526-8498

Анотація: Предметом дослідження є теоретико-методичні підходи до формування структури інституціонального механізму регулювання логістичної діяльності підприємств. Метою дослідження є виокремлення структурних компонент механізму регулювання логістичної діяльності підприємств, що забезпечують управління, узагальнено зміст таких структурних компонент, визначення їх ролі та завдань у комплексній системі. За елементами визначено складові організаційної структури механізму регулювання логістичної діяльності підприємств. Дослідження проведено з використанням сукупності методів: загальні методи - узагальнення, абстрагування, системно-структурний, спеціальні методи економічно - статистичного аналізу: порівняльного аналізу для оцінки динаміки зміни обсягу реалізації продукції промисловими підприємствами України. Узагальнено підходи науковців, щодо змісту поняття логістична діяльність підприємства, визначено роль і значення логістики та логістичних операцій у глобалізованому світі. На основі методів порівнянь та аналізу проведено оцінку динаміки зміни обсягу реалізації продукції промисловими підприємствами України. Структурно інституціональні механізми, що забезпечують процес управління логістичної діяльності підприємств за складовими. Визначено компоненти організаційної структури управління логістичною діяльністю підприємства, охарактеризовано їх цілі та завдання, що є основою для формування комплексної інтегрованої системи організаційного забезпечення механізму регулювання логістичної діяльності підприємства. Обґрунтовано, оптимальне поєднання та взаємоузгодженість структурних компонент дозволить проводити успішну управлінську політику логістичних процесів.

Ключові слова: підприємство, логістична діяльність, інституціональні механізми, структурні компоненти, логістична система.

Вступ (Introduction)

Ефективна робота підприємства та забезпечення його конкурентних позицій на ринку значною мірою визначаються узгодженістю та результативністю взаємодії всіх внутрішніх підсистем, зокрема логістичної. Глобальна пандемія, повномасштабне вторгнення змусили економіку пере налаштуватися на інший режим роботи. Такі тенденції знайшли свій відбиток і в управлінні логістичною діяльністю підприємства.

У сучасному глобалізованому світі логістика та логістичні операції відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності функціонування економіки. Водночас в українських реаліях логістична діяльність підприємств стикається з численними викликами, зумовленими наслідками повномасштабної військової агресії росії. Основна проблема полягає у забезпеченні безперервності та розвитку логістичних процесів як у внутрішній виробничій діяльності, так і в зовнішньоекономічному секторі. У контексті стрімкого розвитку електронної комерції, цифровізації економіки та високої динаміки ринкових змін, логістика набуває ще більшого стратегічного значення, адже підприємства змушені оперативно адаптуватися до нових умов і забезпечувати своєчасну доставку товарів кінцевим споживачам.

Наукові публікації багатьох вітчизняних та міжнародних дослідників розкривають засади управління логістичною діяльністю підприємств, зокрема: Конішчева Н.Й., Трушкіна Н.В., Попова І.В., Мельникова К.В., Сумець О.М., Пилипчук К.М., Руденко С.В., Лінтур І.В., Питьовка О.І., Стручок Н.М., Шишкіна О.В., Васильчак С.В., Жидяк О.Р., Вівчарук О.М., Соловій С.Б., Перебийноса В.І., Колодзієвої Т.О. та інших.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Дослідження проведено з використанням сукупності методів: загальні методи - узагальнення, абстрагування, системно-структурний, спеціальні методи економічно-

статистичного аналізу для порівняння та оцінки динаміки зміни обсягу реалізації продукції промисловими підприємствами України.

Науковою базою для дослідження є публікації міжнародних вчених, дослідників, щодо управління логістичною діяльністю підприємства, матеріали науково-практичних семінарів, симпозіумів та конференцій, законодавчо-нормативні документи України, а також статистичні дані суб'єктів ринку.

Результати (Results)

Великі черги на кордоні, зруйнована інфраструктура автошляхів та перебої з електропостачанням виступають серйозними бар'єрами для ефективного здійснення логістичних операцій. У реаліях воєнного стану підприємства зіткнулися зі змінами в імпортно-експортних процедурах, що потенційно впливає на структуру попиту. За таких обставин перед бізнесом постала необхідність модернізації логістичних систем задля забезпечення їхньої гнучкості, адаптивності до змін ринкової ситуації та здатності оперативно реагувати на нові виклики. Крім того, актуальним є завдання оптимізації логістичних процесів для мінімізації втрат та підтримання стабільної діяльності підприємств.

Економіка України в умовах війни зазнає суттєвих збитків, зокрема внаслідок значного руйнування логістичної інфраструктури. Із п'яти видів транспорту наразі працюють лише три - автомобільний, залізничний і трубопровідний. У такій ситуації підприємства змушені шукати альтернативні маршрути та ефективні логістичні рішення для забезпечення доставки продукції. Відтак, дослідження сучасного стану логістичної діяльності підприємств та визначення шляхів її вдосконалення набуває особливої актуальності.

Логістика, як концепція сучасного менеджменту, орієнтована на інтеграцію всіх логістичних функцій і процесів і дозволяє не тільки ефективно координувати всі фізичні та цифрові потоки товарів і послуг, але також має здатність вирішувати проблеми і використовувати потенціал ефектів в операційній та стратегічній діяльності підприємства (*Konishcheva N. Y., Trushkina N. V., 2005*).

Науковець Попова І.В. у своїх наукових дослідженнях розглядає логістичний підхід як управлінську філософію на підприємствах різних галузей, яка впроваджується через систему логістичного менеджменту і розробляється відповідно до рівня застосування логістики та інтеграції логістичних процесів (*Popova I. V., 2010*).

У своїх наукових працях Н.Й. Коніщева та Н.В. Трушкіна проаналізували послідовність здійснення логістичної діяльності на підприємствах, запропонували авторське трактування поняття «логістична діяльність промислового підприємства», а також уточнили та доповнили перелік логістичних функцій, притаманних підприємствам цієї сфери (*Konishcheva N. Y., Trushkina N. V., 2010*).

Дослідниця К.В. Мельникова провела ґрунтовний аналіз змісту поняття «логістична діяльність підприємства» та акцентувала увагу на доцільності впровадження системи статистичного спостереження за логістичними процесами. Вона підкреслює, що статистичні дані в логістиці відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного збору, обробки та аналізу інформації, необхідної для дослідження показників діяльності, результатів моніторингу та формування звітності (*Melnykova K. V., 2021*).

Ґрунтовний аналіз поняття «логістична діяльність» представлено у науковій праці Сумець О.М. Авторка розробила піраміду термінів, що слугують основою для формування цього поняття, а також запропонувала власне його тлумачення. У дослідженні чітко визначено основну мету та завдання логістичної діяльності, а також подано концептуальну модель, яку авторка називає «візитною карткою логістичної діяльності» (*Sumets O. M., 2013*).

На думку авторів Пилипчук К.М. та Руденка С.В. логістична діяльність підприємства являє собою сукупність взаємопов'язаних логістичних підсистем, які функціонують у межах визначеної території, об'єднані внутрішньовиробничими зв'язками, впорядкованими

відповідно до встановлених правил і процедур. Ці підсистеми спрямовані на досягнення єдиної логістичної мети підприємства або їх об'єднання (*Rudenko S. V., Pylypchuk K. M., 2022*).

Варте уваги дослідження Стручок Н.М., яке визначає та обґрунтовує структуру системи логістики, як інструменту забезпечення економічної безпеки підприємства. Науковцем визначено структуру, цілі та функції логістичної системи в комплексній системі економічної безпеки підприємства в сучасних умовах (*Struchok N.M., 2020*).

Необхідність оперативного та ефективного реагування на зміну ринкових умов підкреслює важливість створення результативної системи логістики. Вона, інтегрована в довгострокові цілі компанії, здатна значно вплинути на трансформацію всієї системи управління логістичними процесами зазначають у своїх дослідженнях науковці Лінтур І.В. та Питьовка О.І. (*Lintur, I., Pytovka, O., 2025*).

Підсумовуючи результати дослідження, необхідно відзначити вагомість та необхідність в управлінні та розвитку підприємництва України комплексного підходу до управління їх логістичною діяльністю. Така необхідність обґрунтована і розвитком діяльності промислових підприємств, обсяг реалізації продукції яких за період демонструє тенденцію до зростання (рис.1). Варто відзначити, після періоду тотального карантину, зняття обмежень, обсяг реалізації промислової продукції підприємствами України у 2021 році зріс при порівнянні до 2020 року на 41,2%. Зовнішні загрози 2022 року призвели до зупинення процесу виробництва та зменшення обсягу промислової продукції на 31,5%. Проте політика уряду та програми підтримки, які були запропоновані промисловим підприємствам дозволили відновити обсяги виробництва продукції у 2024 році практично до рівня 2021 року. На жаль, багато промислових підприємств зустрілись з неефективною системою логістичного забезпечення, що актуалізує наше дослідження пошуку та напрацювання механізмів, інструментів, методів та структурних компонент для його формування через комплекс інституціонального забезпечення.

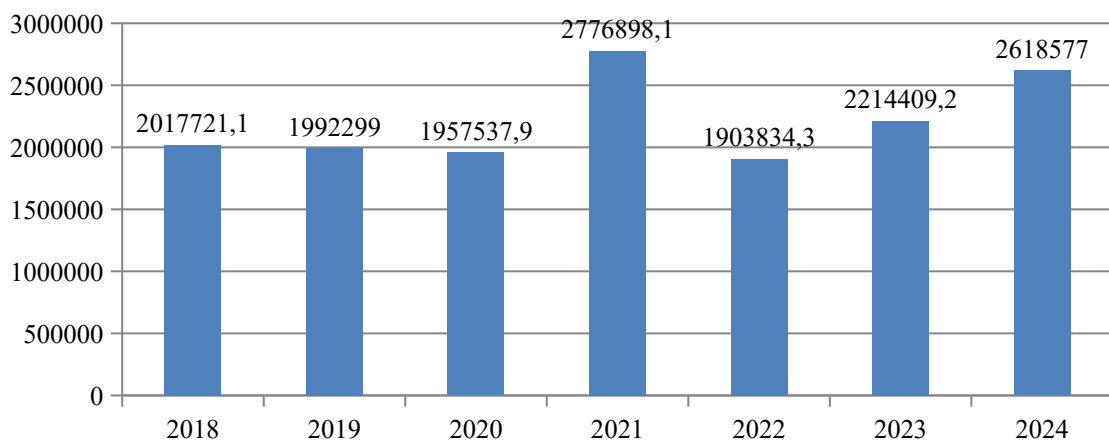


Рисунок 1. Обсяг реалізації промислової продукції підприємствами України впродовж 2018-2024 років, млн. грн.

Джерело: Розроблено авторами

Інституціональні механізми регулювання логістичної діяльності підприємств включають сукупність організаційних, правових, економічних та соціальних інструментів і структур, що сприяють ефективному управлінню логістичними процесами під час їх оновлення або модернізації. Вони мають на меті створення сприятливих умов для оптимізації логістичних операцій і розвитку промислового підприємства в умовах змін на ринку.

Структурно інституціональні механізми, що забезпечують процес управління логістичної діяльності промислових підприємств варто визначити за наступними складовими:

1. Нормативно-правова база. Регулювання логістичної діяльності через закони, стандарти та нормативи становить основу інституційних механізмів. Наявність чітко визначених правил допомагає уникати конфліктів, підвищувати прозорість процесів і

відповідати міжнародним стандартам. Наприклад, митне законодавство прямо впливає на ефективність транспортування товарів через кордони.

2. Організаційна структури. Створення та функціонування спеціалізованих структур з управління логістикою, таких як логістичні центри або координуючі підрозділи, є важливим кроком у розвитку підприємств.

3. Інформаційні технології. Одним із ключових інституційних чинників є впровадження сучасних систем управління логістикою – це ERP-системи (Enterprise Resource Planning), TMS (Transportation Management Systems) та WMS (Warehouse Management Systems). Інформаційні технології відіграють вирішальну роль у моніторингу, аналізі й оптимізації логістичних операцій.

4. Міжнародна співпраця. У зв'язку з глобалізацією бізнесу зростає потреба у взаємодії підприємств із зарубіжними партнерами. Інституційні механізми в цьому контексті спрямовані на гармонізацію локальних і міжнародних правових норм, а також розвиток партнерських мереж між багатонаціональними корпораціями.

5. Державна підтримка. Політика державних органів може бути важливим стимулом для розвитку логістичної діяльності. Це стосується фінансування інфраструктурних проєктів, оптимізації податкової системи для транспортних і складських підприємств, а також створення спеціальних економічних зон (рис.2).

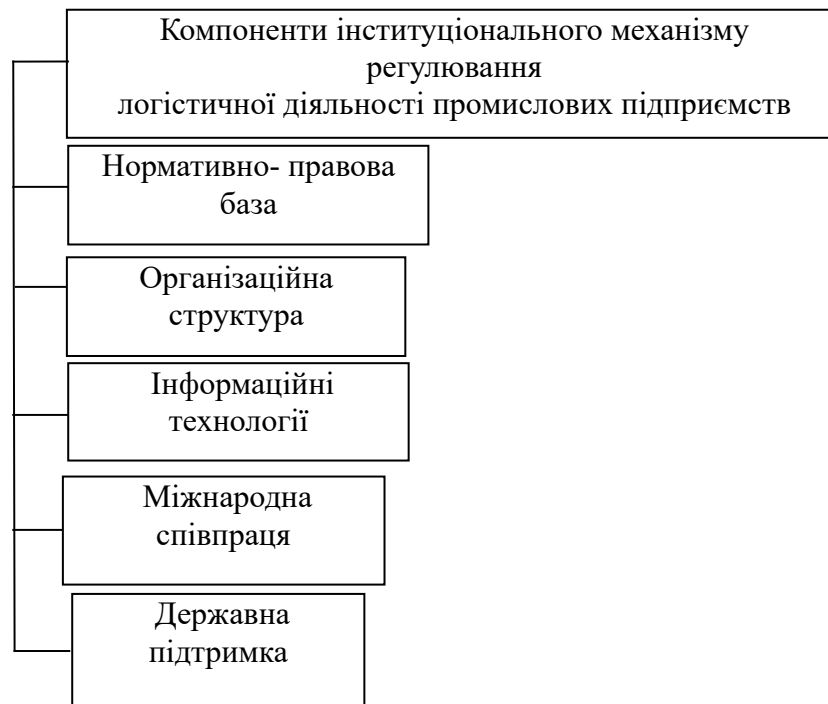


Рисунок 2. Структурні компоненти інституціонального механізму регулювання логістичної діяльності промислових підприємств*

* власні узагальнення автора

Використання інституціональних механізмів дає змогу підприємствам забезпечувати стабільність діяльності, оперативно адаптуватися до зовнішніх змін і підвищувати загальну ефективність логістики. Чітко визначені правила та процедури допомагають мінімізувати ризики, пов'язані з невизначеністю в постачаннях і змінами на ринку. Одночасно запровадження таких потужних інструментів, як стандартизація процесів та автоматизація операцій, забезпечує основу для стійкого конкурентного розвитку промислового підприємства.

У цьому дослідженні детальніше розглянемо принципи та механізми організаційного забезпечення управління логістичною діяльністю промислового підприємства. Логістична діяльність підприємства управляється на основі її структури, що включає такі компоненти:

1. Логістична система - це адаптивна структура зі зворотним зв'язком, яка виконує комплекс логістичних функцій та операцій, забезпечуючи узгодженість і ефективність матеріальних та інформаційних потоків у межах підприємства. Вона складається з підсистем і характеризується розвинутими внутрішніми зв'язками, а також взаємодією із зовнішнім середовищем.

Більшість логістичних систем, що ефективно працюють на практиці, як і інші складні системи, мають такі характеристики:

- складність, яка проявляється у великій кількості елементів (ланок), складному характері взаємодії між ними, різноманітності функцій, які виконує система, складності управління, а також у впливі численних випадкових факторів із зовнішнього середовища;

- ієрархічність, що передбачає взаємозалежність елементів нижчого рівня від елементів вищого рівня в межах лінійного чи функціонального логістичного управління;

- цілісність, тобто здатність системи загалом виконувати задану цільову функцію, яка не може бути реалізована окремими ланками чи підсистемами;

- структурованість полягає в існуванні організованої структури логістичної системи, яка включає взаємопов'язані об'єкти та суб'єкти управління, спрямовані на досягнення визначеної мети;

- рухливість логістичної системи характеризується здатністю її елементів змінювати свої параметри під впливом зовнішніх факторів та управлінських рішень, що приймаються учасниками логістичного ланцюга.

- унікальність, непередбачуваність і невизначеність проявляються в особливостях поведінки системи в конкретних обставинах та під впливом зовнішніх умов;

- адаптивність відображає здатність логістичної системи трансформувати свою структуру та обирати певні варіанти дій у відповідь на нові цілі і вплив зовнішнього середовища.

2. Ланка логістичної системи. Ланкою вважається функціонально або структурно відокремлений підрозділ компанії, а також юридично самостійне підприємство, організація чи установа. Вони виступають однією зі складових логістичної системи та аналізуються як єдине ціле в межах цієї системи, підсистеми чи логістичної мережі (каналу або ланцюга). Така ланка займається виконанням одного чи декількох видів логістичної діяльності (*Shyshkin V.O., 2019*);

3. Логістичний канал є частково структурованою сукупністю різних учасників (виробників, посередників, перевізників, страховиків та інших), які забезпечують доставку матеріального потоку від виробника до кінцевого споживача. Він представляє собою мережу взаємодій, спрямованих на ефективне переміщення і правильне розташування запасів (*Vasylchak S., Zhydiak O., Solovii S., Vivcharuk O., 2024*)

4. Логістичний ланцюг являє собою послідовно організовану сукупність фізичних або юридичних осіб (таких як виробники, посередники, склади тощо), які здійснюють логістичні операції. Ці операції спрямовані на переміщення матеріальних потоків між логістичними системами, а також на оптимізацію пов'язаних з ними інформаційних і фінансових потоків.

Необхідно відзначити, що логістичний ланцюг формують відокремлені ланки такі, як

- закупівля та постачання матеріалів і сировини;
- зберігання сировини та готової продукції;
- виробництво товарів;
- розподіл;
- транспортування вантажів;
- споживання готової продукції (*Perebyinis V.I., 2005*).

Організаційна структура ланцюга постачання може набувати різних форм залежно від низки чинників: вартості продукції, її габаритних та вагових характеристик, строків зберігання, рівня доступності, розмірів підприємства, географічного масштабу його діяльності, необхідної швидкості доставки та наявної інфраструктури.

4. Логістична мережа - це цілісна сукупність елементів логістичної системи, між якими формуються взаємозв'язки на основі основного та/або додаткового потоку в рамках аналізованої чи створюваної логістичної структури (*Kolodizieva T.O., 2015*).

Мережева структура організації логістики має розглядатися як формування гнучкої поліцентричної системи, яка дозволяє юридично незалежним компаніям, що входять до неї, мати власні цілі, конкурувати одна з одною, залучати нових партнерів та водночас ефективно організовувати і координувати спільну діяльність. При цьому взаємини з партнерами будуються на основі ринкових механізмів, а не за допомогою адміністративних методів. Такий підхід сприяє трансформації організацій з ієрархічною (системною) структурою управління у мережеві моделі, максимально адаптовані до реалій сучасної економіки.

Оптимальне поєднання та взаємоузгодженість у роботі дозволить проводити успішну управлінську політику логістичних процесів, забезпечуючи тим самим розвиток галузі на внутрішньому та зовнішньому ринку у довгостроковій перспективі.

Висновки (Conclusions)

Збільшення обсягів виробництва та активізація внутрішніх і міжнародних зв'язків спричинили зростання витрат у сфері логістики, що стимулювало підприємств шукати більш ефективні шляхи оптимізації процесів та скорочення затрат у цій сфері. Розвиток логістики залежить не лише від прагнення підприємства зменшити витрати на транспортування, але й від двох визначальних чинників: ускладнення ринкових відносин і зростання вимог до якості процесів розподілу, а також необхідності впровадження гнучких організаційних структур інституційного забезпечення.

Розвиток дієвої системи управління логістичною діяльністю підприємства є одним із ключових чинників для підвищення його ефективності, покращення конкурентоспроможності, забезпечення сталого розвитку. Удосконалення інституційних основ управління у цій сфері є важливим кроком до створення сприятливих умов для бізнесу та підтримки розвитку логістичного сектору промислових підприємств.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Автори даної науково-дослідницької статті внесли відповідний вклад у дослідження та проведення аналізу проблематики, щодо напрацювання структури інституційних механізмів регулювання логістичної діяльності підприємства. Концептуалізація та методика, здійснено огляд літератури, актуалізовано проблематику, запропоновано рекомендації, В.С.; структуризовано підходи визначеної проблематики, П.О.; проведено аналіз даних, побудовано рисунки, актуалізовано та візуалізовано дані, К.С. Автор погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Kolodizieva T.O. (2015). Vyznachennia lantsiuhiv postavok ta yikhnia rol u pidvyshchenni efektyvnosti lohistychnoi diialnosti pidpriemstv. Problemy ekonomiky. 2015. № 2. S. 133-139. Bibliohr.: 22 nazv. - ukp, 2.
- Konishcheva N.Y., Trushkina N.V. (2005). Upravlinnia lohistychnoiu diialnistiu promyslovykh pidpriemstv. Ekonomika promyslovosti. № 1 (27). S. 114-124.

- Lintur, I., Pytovka, O. (2025). Ekonometrychni modeli yak instrument formuvannia efektyvnoi lohistyky v transkordonnomu biznesi. Stalyi rozvytok ekonomiky, (4(51), 441-445. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-51-63>.
- Melnykova K.V. Efektyvnist diialnosti lohistychnykh system (2021). Biznes Inform. 2021. № 12. S. 283-287. Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2021_12_41.
- Perebyinis V.I. (2005). Transportno-lohistychni systemy pidpriemstv: formuvannia ta funktsionuvannia: monohrafiia. Poltava. 207 s.
- Popova I.V. (2010). Lohistychnyi menedzhment yak skladova lohistychnoho potentsialu pidpriemstva [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://archive.nbuv.gov.ua/portal/soc_gum/vsunu/2010_11_2/Popova.pdf
- Rudenko S. V., Pylypchuk K. M. (2022). Osnovni kharakterystyky poniattia lohistyky i systemy upravlinnia lantsiuhamy postachan. Innovation and Sustainability. №3. S. 95–102.
- Shyshkin V.O. Ya.Iu. Bakhmetova. (2019). Perspektyvy vykorystannia lohistychnoi stratehii yak umova zabezpechennia konkurentospromozhnosti pidpriemstva. Modern Economics. – 2019. № 14. S. 296–300.
- Struchok N.M., Viter O.M., Kylyn O.V. (2020). Stratehichni pidkhody v upravlinni zbutom tovariv ta posluh. Tavriiskyi naukovi visnyk. Seriia Ekonomika. Vypusk 4 (60) 2020, 206s., S.116-125.
- Sumets O.M. Zmistovyi analiz definitsii «lohistychna diialnist». Stalyi rozvytok ekonomiky. 2013. №4. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sre_2013_4_63.
- Vasylchak S., Zhydiak O., Solovii S., Vivcharuk O. (2024) Sutnist ta mistse lohistychnoi diialnosti v systemi upravlinnia pidpriemstvom. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Innovative Solutions in Science: Balancing Theory and Practice» (October 28-30, 2024 San Francisco, USA) R.106-109. URL: <https://www.eoss-conf.com/arkhiv/innovative-solutions-in-science-balancing-theory-and-practice/>



Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"

Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: etc@duet.edu.ua Journal homepage: <https://etc.org.ua>

JEL: O33, L86, F23, H56, J24

DOI: 10.62911/etc.2025.03.01.04

The IT market of Ukraine in times of war

Citation:

Potyomkin, I., & Kucheroва, H. (2025). The IT market of Ukraine in times of war. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol. 3 No. 1 (2025), 41-53. <https://doi.org/10.62911/etc.2025.03.01.04>

Igor Potyomkin

Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: potyomkin_io_23567@kneu.dp.ua

 *ORCID ID: 0009-0005-1967-3197*

Hanna Kucheroва

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: kucherovahanna@gmail.com

 *ORCID ID: 0000-0002-8635-6758*

Abstract: The Ukrainian IT market has proven to be one of the most resilient and adaptive sectors of the national economy during the ongoing full-scale war. Despite facing unprecedented challenges, including geopolitical risks, military actions, and global economic turbulence, the industry continues to play a vital role in supporting the country's economic stability and international integration. This article explores the key trends, threats, and adaptation mechanisms that define the current state of Ukraine's IT industry. The main goal of the study is to analyze the impact of war-related disruptions and macroeconomic instability on the performance and structure of the IT sector, and to identify the strategies Ukrainian companies employ to maintain their positions in global markets. The research methodology involves a combination of data analysis, including IT export indicators, financial and market scoring metrics (FinScore and MarketScore), and the examination of public sources such as industry rankings, expert reports, and statistical databases. Methods of comparative analysis, synthesis, and empirical interpretation were applied to assess the sector's response to internal and external stress factors. The findings show that although Ukraine's IT export volume declined by 8.5% in 2023, the first quarter of 2024 showed signs of stabilization and slight recovery. Major IT companies like EPAM, SoftServe, and GlobalLogic demonstrated notable resilience through digital innovation, operational flexibility, and market diversification. However, many other firms struggled with human resource losses, project reductions, and financial burdens. The study concludes that the future development of Ukraine's IT market will depend on the sector's ability to transform from a predominantly service-oriented model into a product-service hybrid, leveraging emerging technologies such as artificial intelligence, cybersecurity, and cloud computing. In addition, entering new geographic markets, especially outside traditional client regions like the US and EU, is becoming increasingly important. These transformations will help Ukrainian IT companies remain competitive and sustainable despite ongoing war conditions and global uncertainty.

Received: 10/06/2025

Accepted: 16/06/2025



Keywords: Ukrainian IT market, war impact, digital economy, IT exports, FinScore, MarketScore, business resilience.

The IT market of Ukraine in times of war

Igor Potyomkin

Postgraduate student, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: potyomkin_io_23567@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0005-1967-3197

Hanna Kucheroва

Prof., DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: kucherovahanna@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0002-8635-6758

Abstract: The Ukrainian IT market has proven to be one of the most resilient and adaptive sectors of the national economy during the ongoing full-scale war. Despite facing unprecedented challenges, including geopolitical risks, military actions, and global economic turbulence, the industry continues to play a vital role in supporting the country's economic stability and international integration. This article explores the key trends, threats, and adaptation mechanisms that define the current state of Ukraine's IT industry. The main goal of the study is to analyze the impact of war-related disruptions and macroeconomic instability on the performance and structure of the IT sector, and to identify the strategies Ukrainian companies employ to maintain their positions in global markets. The research methodology involves a combination of data analysis, including IT export indicators, financial and market scoring metrics (FinScore and MarketScore), and the examination of public sources such as industry rankings, expert reports, and statistical databases. Methods of comparative analysis, synthesis, and empirical interpretation were applied to assess the sector's response to internal and external stress factors. The findings show that although Ukraine's IT export volume declined by 8.5% in 2023, the first quarter of 2024 showed signs of stabilization and slight recovery. Major IT companies like EPAM, SoftServe, and GlobalLogic demonstrated notable resilience through digital innovation, operational flexibility, and market diversification. However, many other firms struggled with human resource losses, project reductions, and financial burdens. The study concludes that the future development of Ukraine's IT market will depend on the sector's ability to transform from a predominantly service-oriented model into a product-service hybrid, leveraging emerging technologies such as artificial intelligence, cybersecurity, and cloud computing. In addition, entering new geographic markets, especially outside traditional client regions like the US and EU, is becoming increasingly important. These transformations will help Ukrainian IT companies remain competitive and sustainable despite ongoing war conditions and global uncertainty.

Keywords: Ukrainian IT market; war impact; digital economy; IT exports; FinScore; MarketScore; business resilience.

ІТ-ринок України в умовах війни

Потьомкін Ігор Олександрович

аспірант, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: potyomkin_io_23567@kneu.dp.ua

 ORCID ID: ID 0009-0005-1967-3197

Кучерова Ганна Юріївна

професор, д.е.н, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: kucherovahanna@gmail.com

 ORCID ID: ID 0000-0002-8635-6758

Анотація: Український ІТ-ринок залишається одним із найбільш динамічних секторів економіки, демонструючи здатність до адаптації навіть в умовах війни. Стаття аналізує трансформаційні процеси, що відбуваються в галузі під впливом зовнішніх загроз: збройного конфлікту, глобальної економічної нестабільності, зниження попиту та зміни інвестиційного клімату. Метою дослідження є виявлення ключових тенденцій, ризиків і стратегій адаптації українських ІТ-компаній в умовах воєнного стану. У дослідженні застосовано комплексний підхід, що включає аналіз динаміки ІТ-експорту, фінансової звітності провідних компаній, зокрема показників FinScore та MarketScore, а також вторинний аналіз ринку на основі даних галузевих рейтингів, публічної аналітики та звітів. Використано методи порівняльного аналізу, статистичного узагальнення та інтерпретації емпіричних даних. У результаті виявлено, що хоча в 2023 році обсяг ІТ-експорту зменшився на 8,5%, у першому кварталі 2024 року відбулося помірне відновлення. Лідери ринку, як-от EPAM, SoftServe, GlobalLogic, демонструють стійкість завдяки інноваційності, оптимізації витрат і виходу на нові ринки. Водночас значна частина компаній стикається з кадровими втратами, зниженням прибутковості та необхідністю перегляду бізнес-моделей. Висновки дослідження свідчать, що головною стратегією розвитку стає перехід від суто сервісної моделі до продуктово-сервісної з акцентом на штучний інтелект, кібербезпеку та міжнародну експансію. Така трансформація дозволяє українському ІТ-сектору зберігати конкурентоспроможність і потенціал до зростання попри складні зовнішні умови.

Ключові слова: ІТ-ринок України, вплив війни, цифрова економіка, ІТ-експорт, FinScore, MarketScore, стійкість бізнесу.

Вступ (Introduction)

Інформаційно-технологічний сектор України залишається одним із ключових елементів національної економіки, демонструючи стійкість навіть в умовах збройного конфлікту. Втім, з'явилися події, що досить складно вбудувати в сучасну модель функціонування ІТ-компаній України. Із плином часу накопичуються дестабілізуючі фактори, які чинять тиск навіть на найбільш витривалі системи. Завершення періоду активних світових інвестицій у галузь, що спостерігався під час пандемії COVID-19, призвів до загального зниження обсягів капіталовкладень. Функціонування вітчизняного ІТ-ринку характеризується домінуванням аутсорсингових послуг та розробки інноваційних технологій, широким використанням проєктного підходу та командної співпраці на тлі посилення адаптивної функції бізнес-систем. Відтак, галузь істотно залежить від зовнішніх замовлень і кадрового потенціалу, що забезпечує принаймні 70% реалізації проєктів внутрішніми ресурсами, тоді як решта — завдяки залученим спеціалістам [1]. Таким чином, сформувалися прогалини у системі, що потребують не тільки поточного, а і довогострокового підходу до відновлення стійкості функціонування систем.

Воєнний конфлікт створює значні ризики для діяльності компаній, зокрема щодо безпеки персоналу та збереження матеріально-технічної бази, що, у свою чергу, негативно впливає на ефективність роботи. Загроза ракетних атак, перебої в енергопостачанні та вимушене розміщення офісів за кордоном призводять до втрат продуктивності та утруднюють виконання контрактів у визначені строки. Головне, немає чіткого уявлення про кінець або заморожування активної військової фази, що поглиблює недовіру інвесторів, потенціальних роботодавців з-за кордону, українських працівників. Для забезпечення стабільності бізнес-процесів компанії змушені інвестувати у резервні джерела живлення, системи зв'язку та інші критично важливі інфраструктурні компоненти, що потребує значних додаткових витрат. За таких умов досить складно зібрати команду та втримати працівників до кінця виконання проєкту.

Крім того, глобальні економічні виклики, включаючи рецесію, призвели до зниження попиту на ІТ-послуги, особливо з боку основних зовнішніх ринків — США та ЄС. Оптимізація витрат міжнародними замовниками спричинила скорочення ІТ-бюджетів і, відповідно, кількості нових контрактів. На тлі зростаючої міжнародної конкуренції українські компанії

змушені конкурувати з фірмами з інших країн, які пропонують аналогічні послуги за нижчими цінами або за умов зменшених ризиків.

Таким чином, ІТ-ринок функціонує в умовах ризиків у наслідок війни та світової трансформації системи розподілу замовлень та формування ІТ-продуктів, що зумовлює доцільність відстеження ключових тенденцій змін ІТ-ринку.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

У дослідженні застосовано комплексний підхід, що включає аналіз динаміки ІТ-експорту, фінансової звітності провідних компаній, зокрема показників FinScore та MarketScore компанії YouControl, а також вторинний аналіз ринку на основі даних галузевих рейтингів, публічної аналітики та звітів. Використано методи порівняльного аналізу, статистичного узагальнення та інтерпретації емпіричних даних, що дозволяє всебічно охарактеризувати ІТ-сектор України.

Результати (Results)

Ризик небезпеки, зменшення обсягів замовлень, мобілізація, нестійкість сформованих команд, вимушене переміщення населення, еміграція фахівців та релокація компаній формують катастрофічний дефіцит кадрів та значно впливають на кадровий потенціал ІТ-сфери України. Це призводить до втрати кваліфікованих спеціалістів і потреби в реорганізації внутрішніх команд. Водночас скорочення доходів на тлі високих операційних витрат, пов'язаних із адаптацією до нових умов, формує суттєве фінансове навантаження на бізнес та працівників.

В умовах військових дій обумовлена обережність або навіть відмову частини іноземних партнерів від співпраці з українськими компаніями, що веде до скорочення кількості нових контрактів і зменшення обсягів поточних проєктів. Це, в свою чергу, обмежує прибутки та знижує інвестиційні можливості компаній. Як наслідок, відбувається оптимізація витрат, зокрема на маркетингову діяльність, впровадження інновацій і вихід на нові ринки, що загрожує зниженням конкурентоспроможності у середньо- та довгостроковій перспективі.

Ускладнюють ситуацію також інфляційні процеси, валютні коливання, політична та економічна нестабільність, що створюють атмосферу невизначеності. Це вимагає від ІТ-компаній України постійної адаптації та пошуку стратегічних рішень для збереження ринкових позицій. Крім того, процеси адаптації потребують значного фінансування, що не закладалось в бюджети проєктів чи не передбачалось бюджетами компаній. У відповідь на виклики бізнес активізував впровадження гнучких форматів праці, вдосконалення систем компенсацій, підтримку професійного розвитку працівників, забезпечення психологічної стабільності, а також збереження згуртованої корпоративної культури. Ширше застосування технологій штучного інтелекту стимулює необхідність прискореного розвитку цифрових компетенцій у працівників. Незважаючи на ці зусилля, у першій половині 2024 року галузь втратила орієнтовно 2,4 тис. фахівців [1]. Згідно з офіційними даними, обсяг ІТ-експорту України у 2023 році становив \$6,7 млрд, що на 8,5% менше від показника 2022 року, та відповідає рівню 2021 року [6]. У першому кварталі 2023 року зберігалася відносна стабільність із незначним спадом порівняно з аналогічним періодом попереднього року [2]. Проте у другому та третьому кварталах спостерігалось помітне зниження внаслідок скорочення або призупинення проєктів міжнародними замовниками через ризики, пов'язані з війною [4, 6]. Критерієм вибору команди залишається знаходження кадрів у безпечній зоні із доступним технічним забезпеченням без обмежень [1, 2, 3, 6].

У четвертому кварталі 2023 року зафіксоване часткове відновлення, зумовлене стабілізацією на окремих ринках, хоча загальні показники залишались негативними [6]. Попри складну ситуацію, українські ІТ-компанії продовжували активно працювати на зовнішніх ринках і підтримувати клієнтську базу, що дозволяло зберігати стабільний потік замовлень [3,

6]. У першому кварталі 2024 року обсяг ІТ-експорту досяг \$1,75 млрд (січень — \$570 млн, лютий — \$585 млн, березень — \$595 млн) [4, 5], що перевищує показники аналогічного періоду 2023 року та свідчить про відновлення певної позитивної динаміки. Зусилля компаній у розширенні присутності на альтернативних ринках, які меншою мірою постраждали від глобальної економічної кризи, частково компенсували скорочення попиту з боку традиційних партнерів — США та країн ЄС. Деякі українські компанії зосередили інвестиції на розробці інноваційних рішень у сферах штучного інтелекту, фінансових технологій і кібербезпеки [6], що дало їм змогу зміцнити позиції на світовому ринку та залучити нових клієнтів і, тим самим, забезпечило нову точку перспективного зростання галузі.

Загалом галузь продемонструвала високу адаптивність до змін, що є наслідком військової агресії: активне впровадження віддалених форматів роботи, створення міжнародних команд, переналаштування бізнес-процесів та організаційної структури оптимізація витрат і трансформація бізнес-моделей дозволили підтримувати стабільний рівень експорту в умовах глибокої нестабільності. За результатами моніторингу найбільших ІТ-компаній України влітку 2024 року зафіксовано незначне зростання [1]. Лідерами залишаються EPAM Systems, SoftServe, GlobalLogic, Luxoft і Ciklum [1, 2], що свідчить про їхню здатність ефективно реагувати на кризові виклики.

Таблиця 1. Динаміка показників фінансового скорингу EPAM

Найменування показника	2020	2021	2022	2023	2024
Індекс FinScore	A/3.3	B/2.8	A/3.4	B/3.0	B/2.6
Поточна ліквідність	396,10%	354,80%	728,20%	1350,40%	1867,80%
Абсолютна ліквідність	24,40%	54,80%	130,70%	146,90%	161,10%
Коефіцієнт "Кислотний тест"	393,70%	350,50%	725,10%	1345,70%	1862,40%
Коефіцієнт швидкої ліквідності	393,60%	350,50%	725,10%	1345,70%	1862,40%
Відношення грошових коштів до активів	4.4%	10,20%	14.5%	9.2%	7,50%
Проміжний коефіцієнт покриття	27,60%	56,90%	162,60%	156,40%	170,50%
Коефіцієнт автономії	74,20%	78,00%	86,60%	93,00%	95,10%
Відношення чистого боргу до EBITDA	0,6	0.4	0.0	0.0	0.0
Коефіцієнт покриття необоротних активів власним капіталом	262,70%	229,30%	445,40%	609,90%	734,80%
ROA - Рентабельність активів	15.5%	16.4%	32,60%	11.7%	13,10%
Рентабельність власного капіталу	26,40%	26,60%	60,40%	14,30%	15,90%
RCA - рентабельність оборотних активів	21.6%	26,60%	60,40%	14,30%	15,90%
NPM- Чиста маржа	9.0%	8.2%	17,00%	10.4%	14.7%
ROTA - рентабельність загальних активів	21,40%	20.5%	41,30%	14,50%	16,20%
Валова рентабельність собівартості	14,40%	15,50%	20,00%	18,70%	18,90%
Рентабельність операційних витрат	221,40%	307,80%	509,00%	271,00%	266,30%

Чиста рентабельність витрат	13,40%	11,00%	24,70%	14,30%	20,20%
Оборотність загальних активів	2.0	2.0	2.3	1.2	0.9
Оборотність робочого капіталу	3.7	4.4	3.7	1.6	1.2
Оборотність дебіторської заборгованості	3.1	3.6	3.7	1.6	1.2

Побудовано за даними <https://youcontrol.com.ua/>

Отже, спостерігається поступове зниження індексу FinScore з A/3.4 (2022) до B/2.6 (2024), що свідчить про певне погіршення фінансової стійкості.

Таблиця 2. Динаміка показників ринкового скорингу EPAM

Найменування показника	2020	2021	2022	2023	2024
Індекс MarketScore	A/3.8	A/3.8	A/4	A/3.2	B/3
Частка у секторі	4.89%	5.25%	7.10%	3.38%	3.06%
Частка у ринку	12.47%	11.88%	14.04%	7.68%	6.11%
Частка у субринку	12.47%	11.88%	14.04%	7.68%	6.11%
Місце компанії у секторі	3	3	2	3	5
Місце компаній на ринку	1	1	1	1	2
Місце компанії у субринку	1	1	1	1	2
Абсолютний приріст виручки за рікб млн. грн	2 339.4	4256.8	5510.8	-7596.5	- 1 266.6
Відсотковий приріст виручки за рік, %	28.9%	40.8%	37.5%	- 37.6%	- 10.0%
Абсолютний середньорічний приріст виручки за 3 роки, млн грн	1 798,60	2753,2	4035,7	723,7	-1 117,40
Середньорічний темп зростання виручки за 3 роки, %	27,40%	31,70%	35,60%	6.5%	-8,30%

Побудовано за даними <https://youcontrol.com.ua/>

Зниження індексу з A/4 (2022) до B/3 (2024) також відображає втрату ринкових позицій, зокрема зменшення частки на ринку з 14,04% до 6,11%. EPAM зберігає високу ліквідність та нульову боргову залежність, але стикається з ринковим тиском і зменшенням темпів зростання. Попри це, компанія залишається лідером галузі.

SoftServe підтримує другу позицію, продовжуючи активну експансію на міжнародні ринки і фокусуючись на інноваціях (табл. 3,4).

Таблиця 3. Динаміка показників ринкового скорингу SoftServe

Найменування показника	2020	2021	2022	2023	2024
Індекс MarketScore	A/4	A/3.9	A/3.9	A/3.2	B/2,8
Частка у секторі	0,19%	0,18%	0,19%	0,05%	0,00%
Частка у ринку	0,49%	0,40%	0,38%	0,10%	0,01%
Частка у субринку	0,49%	0,40%	0,38%	0,10%	0,01%
Місце компанії у секторі	60	60	52	244	1941
Місце компаній на ринку	27	31	32	144	1085
Місце компанії у субринку	27	31	32	144	1085
Абсолютний приріст виручки	215,6	94	51,2	-388,5	-149,3

за рік б млн. грн					
Відсотковий приріст виручки за рік, %	112,60%	23,10%	10,20%	-70,40%	-91,20%
Абсолютний середньорічний приріст виручки за 3 роки, млн грн	107,30	120,7	120,2	-81,1	-162,20
Середньорічний темп зростання виручки за 3 роки, %	68,50%	53,40%	42,40%	-26,20%	-69,40%

Побудовано за даними <https://youcontrol.com.ua/>

Індекс демонструє різке падіння з А/3.9 (2022) до В/2.8 (2024), частка ринку знизилась майже до 0,01%, а позиція на ринку — з 27 до 1085.

Таблиця 4. Динаміка показників фінансового скорингу SoftServe

Найменування показника	2020	2021	2022	2023	2024
Індекс FinScore	A/3.5	A/3,3	A/3,3	C/2,1	B/2.8
Поточна ліквідність	354,40%	364,40%	360,20%	103,90%	299,60%
Абсолютна ліквідність	31,50%	168,20%	30,60%	6,20%	1,10%
Коефіцієнт "Кислотний тест"	354,40%	364,40%	360,20%	103,90%	299,60%
Коефіцієнт швидкої ліквідності	354,10%	363,80%	360,10%	103,70%	297,30%
Відношення грошових коштів до активів	8,50%	45,20%	8,40%	5,80%	0,40%
Проміжний коефіцієнт покриття	354,10%	363,80%	360,10%	103,70%	297,30%
коефіцієнт автономії	73,00%	73,10%	72,40%	6,20%	66,70%
Відношення чистого боргу до EBITDA	0,2	0	0,6	7	0,4
Коефіцієнт покриття необоротних активів власним капіталом	1766,80%	3575,20%	10489,40%	239,80%	27594,60%
ROA - Рентабельність активів	63,20%	36,60%	24,20%	7,30%	67,70%
Рентабельність власного капіталу	650,3%	60,80%	50,10%	1,30%	120,00%
RCA - рентабельність оборотних активів	66,00%	37,40%	24,30%	7,50%	67,90%
NPM- Чиста маржа	27,80%	15,80%	14,30%	1,80%	21,40%
ROTA - рентабельність загальних активів	77,30%	44,80%	30,10%	9,70%	89,90%
Валова рентабельність собівартості	54,30%	30,70%	14,10%	4,50%	52,80%
Рентабельність операційних витрат	564,70%	438,20%	283,20%	73,30%	156,30%
Чиста рентабельність витрат	47,70%	23,60%	19,40%	2,40%	32,50%
Оборотність загальних активів	3.0	2.6	2.0	0.9	0.6
Оборотність робочого капіталу	6.4	3.6	2.8	1.4	6.4
Оборотність дебіторської заборгованості	3.7	3.8	2.7	1.0	0.7

Побудовано за даними <https://youcontrol.com.ua/>

Індекс FinScore : з A/3.5 (2020) до B/2.8 (2024), зі значним просіданням у 2023 (C/2.1) - ознака фінансових труднощів у розпал кризи. SoftServe переживає суттєве падіння виручки та ринкової частки, однак демонструє часткове фінансове відновлення у 2024 році. Потрібна глибока трансформація моделі росту.

GlobalLogic посідає третє місце з акцентом на цифрові продукти та розширення співпраці з міжнародними партнерами (табл. 5,6).

Таблиця 5. Динаміка показників фінансового скорингу GlobalLogic

Найменування показника	2020	2021	2022	2023	2024
Індекс FinScore	A/3.1	A/3,5	A/3.7	B/3.0	B/2.8
Поточна ліквідність	505,00%	717,70%	772,20%	679,50%	421,30%
Абсолютна ліквідність	21,10%	43,00%	18,70%	69,90%	53,30%
Коефіцієнт "Кислотний тест"	504,40%	717,00%	771,80%	679,20%	421,20%
Коефіцієнт швидкої ліквідності	500,60%	712,00%	769,40%	677,80%	420,50%
Відношення грошових коштів до активів	2,70%	4,20%	2,10%	9,30%	11,30%
Проміжний коефіцієнт покриття	25,40%	47,80%	30,90%	76,40%	55,10%
коефіцієнт автономії	74,90%	85,50%	88,60%	82,50%	72,20%
Відношення чистого боргу до EBITDA	0,6	0.2	0.2	0.3	0.9
Коефіцієнт покриття необоротних активів власним капіталом	208,10%	294,60%	708,80%	875,70%	694,10%
ROA - Рентабельність активів	13,70%	20,20%	32,20%	18,50%	10,00%
рентабельність власного капіталу	22,30%	30,90%	57,10%	28,90%	16,20%
RCA - рентабельність оборотних активів	21,40%	28,50%	36,80%	20,40%	11,20%
NPM- Чиста маржа	5,00%	6,10%	9,90%	7,90%	5,60%
ROTA - рентабельність загальних активів	19,20%	26,30%	41,70%	19,00%	13,10%
Валова рентабельність собівартості	14,00%	14,60%	13,70%	13,50%	13,40%
рентабельність операційних витрат	226,30%	270,10%	308,90%	316,70%	285,70%
Чиста рентабельність витрат	7,40%	8,90%	13,30%	8,90%	8,40%
Оборотність загальних активів	2.9	3.5	3.9	2.7	2.0
Оборотність робочого капіталу	6.3	6.3	5.6	3.5	2.8
Оборотність дебіторської заборгованості	5.3	5.6	5.1	3.3	2.6

Побудовано за даними <https://youcontrol.com.ua/>

Спостерігаємо помірне зниження індексу з A/3.7 (2022) до B/2.8 (2024), але ключові коефіцієнти залишаються стабільними і сильними (ліквідність, рентабельність).

Таблиця 6. Динаміка показників ринкового скорингу GlobalLogic

Найменування показника	2020	2021	2022	2023	2024
Індекс MarketScore	A/3.8	A/3.8	A/4	A/3.4	A/3,7
Частка у секторі	2,58%	2,75%	4,04%	3,47%	3,15%
Частка у ринку	6,57%	6,23%	8,00%	6,95%	6,28%
Частка у субринку	6,57%	6,23%	8,00%	6,95%	6,28%
Місце компанії у секторі	5	5	4	5	4
Місце компаній на ринку	2	2	2	2	1
Місце компанії у субринку	2	2	2	2	1
Абсолютний приріст виручки за рік. млн. грн	964,7	2205,5	3807,1	-97,9	245,2
Відсотковий приріст виручки за рік, %	21,30%	40,10%	49,40%	-0,90%	2,10%
Абсолютний середньорічний приріст виручки за 3 роки, млн грн	881,20	1315,6	2325,8	1971,6	1 318,20
Середньорічний темп зростання виручки за 3 роки, %	24,40%	27,00%	36,40%	27,60%	14,80%

Побудовано за даними <https://youcontrol.com.ua/>

Ринкові позиції зберігаються на високому рівні — індекс становить A/3.7 (2024 р.), а місце на ринку підвищується до 1-го. GlobalLogic демонструє стійку фінансову структуру та стабільне лідерство, незначне зменшення прибутків компенсується розширенням присутності на ринку.

Лухофт зберігає четверту позицію, завдяки експертизі у фінансовому та автомобільному секторах (табл. 7,8).

Таблиця 7. Динаміка показників фінансового скорингу Luxoft

Найменування показника	2020	2021	2022	2023	2024
Індекс FinScore	B/2,5	B/2.5	B/3.0	B/3.0	B/2.9
Поточна ліквідність	1357,70%	1280,90%	1173,60%	1754,60%	1185,50%
Абсолютна ліквідність	48,80%	16,90%	61,80%	148,60%	77,90%
Коефіцієнт "Кислотний тест"	1338,90%	1280,70%	1172,30%	1748,40%	1182,40%
Коефіцієнт швидкої ліквідності	1314,40%	1253,30%	1158,20%	1729,70%	1171,80%
Відношення грошових коштів до активів	2,40%	1,10%	4,70%	7,70%	6,20%
Проміжний коефіцієнт покриття	1314,40%	1253,30%	1102,07%	1676,60%	1171,80%
коефіцієнт автономії	95,00%	93,70%	92,40%	94,80%	92,00%
Відношення чистого боргу до EBITDA	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1
Коефіцієнт покриття необоротних активів власним капіталом	296,50%	487,80%	888,80%	1057,70%	1841,30%
ROA - Рентабельність активів	2,00%	7,40%	15,20%	11,50%	14,80%
рентабельність власного капіталу	2,10%	8,40%	19,60%	13,80%	19,10%

RCA - рентабельність оборотних активів	2,9	9,10%	16,90%	12,60%	15,60%
NPM- Чиста маржа	2,10%	6,40%	10,90%	7,00%	10,10%
ROTA - рентабельність загальних активів	2,40%	9,00%	18,80%	12,50%	14,00%
Валова рентабельність собівартості	32,70%	24,60%	16,70%	19,00%	20,30%
рентабельність операційних витрат	94,00%	115,40%	122,30%	124,30%	135,80%
Чиста рентабельність витрат	6,00%	5,80%	10,60%	5,20%	9,40%
Оборотність загальних активів	0.9	1.2	1.5	1.7	1.6
Оборотність робочого капіталу	1.6	1.7	1.9	2.0	1.9
Оборотність дебіторської заборгованості	1.4	1.7	1.9	2.1	1.9

Побудовано за даними <https://youcontrol.com.ua/>

Стабільний рівень індексу на рівні В/2.9 (2024 р.). При цьому, розвиток йде з відносно високою ліквідністю та автономією, але низькими темпами рентабельності.

Таблиця 8. Динаміка показників ринкового скорингу Luxoft

Найменування показника	2020	2021	2022	2023	2024
Індекс MarketScore	В/3	А/3.4	А/3.9	А/3.8	А/3.8
Частка у секторі	0,08%	0,09%	0,12%	0,14%	0,14%
Частка у ринку	1,61%	0,19%	0,25%	0,28%	0,27%
Частка у субринку	4,37%	0,19%	0,25%	0,28%	0,27%
Місце компанії у секторі	137	147	86	86	80
Місце компаній на ринку	7	76	50	50	43
Місце компанії у субринку	4	76	50	50	43
Абсолютний приріст виручки за рікб млн. грн	-47,6	58,6	114,4	106,9	45,9
Відсотковий приріст виручки за рік, %	-20,90%	32,40%	47,80%	30,20%	10,00%
Абсолютний середньорічний приріст виручки за 3 роки, млн грн	-23,20	-10,3	41,8	93,3	89,10
Середньорічний темп зростання виручки за 3 роки, %	-10,30%	-4,00%	15,70%	36,60%	28,40%

Побудовано за даними <https://youcontrol.com.ua/>

Фактично стабільно високий рівень індексу (А/3.8) спостерігається на тлі позитивного приросту виручки та обмеженого зростання ринкової частки. Загалом, Luxoft зберігає надійну фінансову базу та консервативну динаміку, не демонструючи яскравого росту, але й уникаючи глибоких криз.

Сіклум залишається на п'ятому місці, продовжуючи розширювати свою глобальну присутність і портфель послуг (табл. 9,10).

Таблиця 9. Динаміка показників фінансового скорингу Ciklum

Найменування показника	2022	2023	2024
Індекс FinScore	-	A/3,2	A/3,5
Поточна ліквідність	98,90%	105,00%	215,70%
Абсолютна ліквідність	18,80%	7,90%	15,10%
Коефіцієнт "Кислотний тест"	98,90%	105,00%	215,70%
Коефіцієнт швидкої ліквідності	98,90%	104,90%	215,50%
Відношення грошових коштів до активів	18,00%	6,70%	5,90%
Проміжний коефіцієнт покриття	98,90%	104,90%	215,50%
Коефіцієнт автономії	4,50%	15,00%	61,00%
Відношення чистого боргу до EBITDA	14,2	2,7	0,6
Коефіцієнт покриття необоротних активів власним капіталом	81,60%	139,50%	386,00%
ROA - Рентабельність активів	4,50%	11,40%	50,40%
рентабельність власного капіталу		320,10%	478,10%
RCA - рентабельність оборотних активів	4,80%	12,80%	59,90%
NPM- Чиста маржа	2,10%	1,20%	2,60%
ROTA - рентабельність загальних активів	5,50%	28,70%	58,00%
Валова рентабельність собівартості	255,90%	55,20%	31,10%
рентабельність операційних витрат	102,90%	107,40%	114,20%
Чиста рентабельність витрат	2,60%	3,20%	3,00%
Оборотність загальних активів	4,2.	10,4	23,1
Оборотність робочого капіталу	-414	542,4	81,8
Оборотність дебіторської заборгованості	5,6	13,1	28,9

Побудовано за даними <https://youcontrol.com.ua/>

Зростання індексу з A/3.2 (2023) до A/3.5 (2024) вказує на динамічне фінансове покращення. Спостерігається ріст рентабельності активів та капіталу.

Таблиця 10. Динаміка показників ринкового скорингу

Найменування показника	2023	2024
Індекс MarketScore	A/4	A/4
Частка у секторі	0.04%	0.10%
Частка у ринку	0.08%	0.20%
Частка у субринку	0.08%	0.20%
Місце компанії у секторі	312	111
Місце компаній на ринку	180	65
Місце компанії у субринку	180	65
Абсолютний приріст виручки за рік млн. грн	103,4	252,2
Відсотковий приріст виручки за рік, %	457,80%	200,20%
Абсолютний середньорічний приріст виручки за 3 роки, млн грн	103,4	177,80
Сукупний середньорічний темп зростання виручки за 3 роки, %	457,80%	309,20%

Побудовано за даними <https://youcontrol.com.ua/>

Рівень індексу стабільний A/4 (обидва роки), з експоненціальним зростанням виручки (на 200,2% у 2024 р.). Ciklum демонструє найбільш позитивну динаміку серед усіх п'яти компаній, завдяки ефективній адаптації до нових умов та агресивному ринковому зростанню. Але період дослідження обмежений.

Серед компаній середнього розміру окремі учасники ринку демонструють позитивну динаміку розвитку. Зокрема, Intellias утримує лідерську позицію в цьому сегменті, що пояснюється активною експансією у сферах автомобільної промисловості та фінансових послуг. Sigma Software забезпечує сталий ріст за рахунок ефективної співпраці з міжнародними стартапами та великими корпоративними клієнтами. Компанія N-iX займає третє місце завдяки здатності масштабувати проекти та глибокій галузевій експертизі. DataArt посилює позиції на ринку фінансових технологій і цифрової охорони здоров'я, зберігаючи четверту сходинку. У свою чергу, ELEKS фокусується на інноваціях у логістиці та сфері роздрібної торгівлі, що сприяє зміцненню її ринкових позицій.

У першому півріччі 2024 року 18 українських ІТ-компаній продемонстрували зростання, що є вагомим досягненням на фоні складної макроекономічної ситуації. Половина з них представляє продуктовий сегмент, що свідчить про посилення тенденції до створення та розвитку власних цифрових рішень. Ці компанії змогли не лише зберегти інвестиційний інтерес, а й розширити присутність на зовнішніх ринках, що свідчить про високий рівень стійкості та інноваційного потенціалу.

Позитивна динаміка стала можливою завдяки впровадженню інноваційних моделей управління, гнучких бізнес-стратегій та здатності оперативно адаптуватися до мінливих ринкових умов. Водночас, 29 компаній зіткнулися з негативною динамікою у тому ж періоді. Основними факторами спаду стали зменшення обсягів замовлень, втрата клієнтів, мобілізація персоналу, релокаційні труднощі, а також загальна економічна нестабільність. У відповідь багато компаній були змушені скоротити персонал або оптимізувати витрати, що ще більше послабило їхні конкурентні позиції.

Висновки (Conclusions)

У період 2023–2024 років український ІТ-ринок продемонстрував значну стійкість і здатність до адаптації в умовах війни, економічної нестабільності та глобального спаду попиту на цифрові послуги. Попри зниження обсягів експорту ІТ-послуг у 2023 році на 8,5%, вже у першому кварталі 2024 року спостерігалось часткове відновлення, що засвідчує потенціал галузі до стабілізації та зростання. Аналіз провідних ІТ-компаній (EPAM, SoftServe, GlobalLogic, Luxoft, Ciklum) за показниками FinScore та MarketScore виявив, що найбільш стабільну динаміку демонструють GlobalLogic та Ciklum, які зуміли не лише зберегти фінансову ефективність, а й зміцнити позиції на ринку. EPAM зберігає лідерство, але показує ознаки уповільнення росту. SoftServe, навпаки, зазнав істотного зниження як фінансових, так і ринкових показників. Luxoft утримує стабільні, хоча й помірні результати. Головні виклики для галузі залишаються незмінними: ризики безпеки, релокація персоналу, кадрові втрати, нестача інвестицій, конкуренція з боку ІТ-секторів інших країн. Водночас компанії демонструють високу адаптивність: впроваджують гнучкі умови праці, цифрові інновації, інвестують у розробку власних продуктів і виходять на нові ринки. Ключовим стратегічним напрямом розвитку ІТ-сектору України є трансформація з сервісної моделі до продуктово-сервісної, з активним впровадженням штучного інтелекту, рішень у сфері кібербезпеки та розширенням географії експорту, зокрема на ринки Близького Сходу, Азії та Латинської Америки. Такий підхід дозволить галузі зберігати конкурентоспроможність, залучати нових клієнтів і забезпечити сталість розвитку навіть в умовах тривалої турбулентності. Перспективою дослідження є обґрунтування розвитку ІТ-ринку в умовах війни на основі прогнозних даних.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів

Фінансування (Funding)

Автори не отримали фінансування на цю роботу.

Внесок авторів (Authors contribution)

Методика дослідження, К.Г.; збір та аналіз отриманих даних, оформлення тексту роботи, П.І.

Література (References)

- DOU.ua. (2024, December 8). *TOP-50 IT companies of Ukraine, summer 2024: minus 2.4 thousand specialists in six months, a new player in the top five*. Retrieved from https://dou.ua/lenta/articles/top-50-summer-2024/?from=recent_pinned
- DOU.ua. (2023, August 14). *TOP-50 IT companies of Ukraine, summer 2023: minus 6 thousand specialists in six months, service companies have fewer clients, product companies hire more actively*. Retrieved from https://dou.ua/lenta/articles/top-50-summer-2023/?from=recent_pinned
- DOU.ua. (2023, April 6). *TOP-50 IT companies of Ukraine, winter 2023: minus 5 thousand specialists due to relocation*. Retrieved from <https://dou.ua/lenta/articles/top-50-winter-2023/>
- DOU.ua. (2024, August 15). *What is happening with Ukrainian IT exports and what are the forecasts? Analytics and opinions of industry representatives*. Retrieved from <https://dou.ua/lenta/articles/it-export-second-quarter-2024/>
- DOU.ua. (2024, May 6). *"Each month of the first quarter is worse than the same period last year": What is happening with Ukrainian IT exports*. Retrieved from https://dou.ua/lenta/articles/it-export-1-quarter-2024/?from=similar_posts
- DOU.ua. (2023, February 6). *The annual volume of Ukrainian IT exports has decreased for the first time. Is it a plateau or a worsening trend? — Analytics and expert opinions*. Retrieved from <https://dou.ua/lenta/articles/it-export-2023/>
- YouControl. (n.d.). *Ukrainian companies and financial analytics platform*. Retrieved from <https://youcontrol.com.ua/>



JEL: A22, C88

DOI: 10.62911/ete.2025.03.01.05

GeoGebra with augmented reality as a tool for teaching mathematics in the training of specialists in the field of management and administration

Citation:

Pylypenko O. (2025). GeoGebra with augmented reality as a tool for teaching mathematics in the training of specialists in the field of management and administration. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol. 3 No. 1 (2025), 54-65. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.01.05>

Olha Pylypenko

PhD, Separate structural unit
"Professional College of Economics and Technology of State University of Economics and Technology", Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: banadaolga96@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0003-0493-8429

Received: 05/06/2025

Accepted: 11/06/2025



Abstract: The rapid development of digital technologies and the increasing demand for practice-oriented education have led to a rethinking of approaches to mathematics teaching, especially in the context of training future specialists in the field of management and administration. Mathematical knowledge plays a key role in economic and financial decision-making, which requires a deep understanding of spatial relationships, analytical structures, and quantitative dependencies. However, students in higher education institutions often encounter difficulties in mastering abstract mathematical concepts, which negatively affects their motivation and professional self-identification. This study explores the potential of the GeoGebra software environment with augmented reality (AR) functions as a modern tool for improving mathematics learning among students of financial and economic specialties. The study included a theoretical review of international literature on the use of AR technologies in education and an experimental test involving students majoring in "Finance, Banking, Insurance, and Stock Market". The experimental group used GeoGebra 3D Calculator with AR to solve geometric, algebraic, and financial math problems, while the control group used traditional methods. The results showed improved understanding of spatial concepts, increased motivation, and better results among students who used AR-based visualizations. In addition, project-based learning activities using GeoGebra AR helped students connect mathematical theory with real-world financial applications. The study confirms the effectiveness of integrating GeoGebra AR into the mathematics curricula for higher education institutions and offers methodological recommendations for its implementation. This approach not only improves the quality of mathematical training but also contributes to the development of digital skills and professional competencies of future specialists in the field of management and administration. The integration of innovative tools like GeoGebra AR aligns with global trends in digital education and supports the formation of a more flexible, adaptive, and future-oriented learning environment.

Keywords: GeoGebra; augmented reality; teaching mathematics; spatial thinking; visualization; digital tools; project-based learning.

JEL: A22, C88

GeoGebra with augmented reality as a tool for teaching mathematics in the training of specialists in the field of management and administration

Olha Pylypenko

PhD, Separate structural unit "Professional College of Economics and Technology of State University of Economics and Technology", Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: banadaolga96@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0003-0493-8429

Abstract: The rapid development of digital technologies and the growing demand for practice-oriented education have led to a rethinking of approaches to mathematics teaching, especially in training future specialists in the field of management and administration. Mathematical knowledge plays a key role in economic and financial decision-making, requiring a deep understanding of spatial relationships, analytical structures, and quantitative dependencies. However, students in higher education often struggle with abstract mathematical concepts, which affects their motivation and professional self-identification. This study explores the potential of the GeoGebra software environment with augmented reality (AR) as a modern tool for enhancing mathematics learning among students of financial and economic specialties. It includes a theoretical review of international literature on AR technologies in education and an experimental test involving students majoring in "Finance, Banking, Insurance, and Stock Market". The experimental group used the GeoGebra 3D Calculator with AR to solve geometric, algebraic, and financial math problems, while the control group applied traditional methods. The results revealed improved spatial understanding, increased motivation, and better academic performance among students using AR-based visualizations. Additionally, project-based learning activities with GeoGebra AR helped link mathematical theory to real-world financial applications. The study confirms the effectiveness of integrating GeoGebra AR into higher education mathematics curricula and provides methodological recommendations. This approach enhances mathematical training quality and supports the development of digital skills and professional competencies of future specialists in the field of management and administration.

Keywords: GeoGebra; augmented reality; teaching mathematics; spatial thinking; visualization; digital tools; project-based learning.

GeoGebra з доповненою реальністю як інструмент навчання математики у підготовці фахівців галузі управління та адміністрування

Ольга Пилипенко

доктор філософії, Відокремлений структурний підрозділ «Фаховий коледж економіки і технологій Державного університету економіки і технологій», Кривий Ріг, Україна

e-mail: banadaolga96@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0003-0493-8429

Анотація: Швидкий розвиток цифрових технологій і зростаючий попит на практико-орієнтоване навчання призвели до переосмислення підходів викладання математики, особливо в контексті підготовки майбутніх фахівців галузі управління та адміністрування. Математичні знання відіграють ключову роль у прийнятті економічних і фінансових рішень, що вимагає глибокого розуміння просторових взаємозв'язків, аналітичних структур і кількісних залежностей. Проте студенти закладів фахової передвищої освіти часто стикаються з труднощами в освоєнні абстрактних математичних понять, що негативно впливає на їхню мотивацію. У цьому дослідженні розглядається потенціал програмного середовища GeoGebra з функціями доповненої реальності (AR) як сучасного інструменту для покращення вивчення математики серед студентів фінансово-економічних спеціальностей. Дослідження охоплює огляд міжнародної літератури щодо застосування AR в освіті та експеримент за участю

студентів спеціальності «Фінанси, банківська справа, страхування та фондовий ринок». Експериментальна група використовувала GeoGebra 3D Calculator з AR для розв'язання геометричних, алгебраїчних і фінансових задач, тоді як контрольна – традиційні методи. Результати засвідчили покращення розуміння просторових понять, підвищення мотивації та кращі результати у студентів, які застосовували AR-візуалізації. Крім того, проєктні навчальні заходи з використанням GeoGebra AR допомогли студентам пов'язати математичну теорію з реальними фінансовими застосуваннями. Дослідження підтверджує ефективність інтеграції GeoGebra AR у навчальні програми математики у ЗФПО та пропонує методичні рекомендації. Такий підхід не лише покращує якість підготовки, а й сприяє розвитку цифрових навичок і професійних компетентностей майбутніх фахівців.

Ключові слова: GeoGebra; доповнена реальність; математична освіта; просторове мислення; візуалізація; цифрові інструменти; проєктне навчання.

Вступ (Introduction)

У XXI столітті ефективна математична підготовка є критично важливою складовою професійної освіти, зокрема у сферах фінансів, економіки та обліку. Вона забезпечує здобувачів освіти не лише базовими обчислювальними навичками, а й розвиває логічне, аналітичне та просторове мислення, необхідне для прийняття обґрунтованих рішень у реальних економічних ситуаціях. Водночас численні дослідження засвідчують, що студенти закладів фахової передвищої освіти часто стикаються з труднощами у вивченні математики, що пов'язано з її абстрактним характером, недостатньою візуалізацією понять та низькою навчальною мотивацією (Lytvynova et al., 2020; Petrov, Atanasova, 2020).

На тлі цих викликів особливого значення набуває впровадження цифрових технологій у навчальний процес, які сприяють персоналізації освіти та підвищують залучення студентів до пізнавальної діяльності. Однією з таких технологій є доповнена реальність (AR), яка поєднує віртуальні об'єкти з фізичним світом і дозволяє виводити математичні моделі у реальний простір. Потенціал AR як засобу навчання активно досліджується у різних дисциплінах, зокрема у геометрії, фізиці, інженерії та медичній візуалізації (Ibáñez, Delgado-Kloos, 2018; Garzón et al., 2019; Vakaliuk, Pochtoviuk, 2021). Окремі публікації доводять, що AR значно покращує розуміння просторових конструкцій та сприяє розвитку критичного мислення (Garzón, Acevedo, 2020). Дослідження показали, що використання доповненої реальності в поєднанні з проблемно-орієнтованим навчанням покращує математичну комунікацію студентів (Batubara et al., 2022).

Одним із перспективних напрямів використання доповненої реальності в освіті є вивчення планіметрії та стереометрії, що передбачає візуалізацію геометричних об'єктів та динамічне дослідження їх властивостей. Окремі дослідження доводять, що використання інструментів доповненої реальності під час вивчення двовимірної геометрії сприяє кращому розумінню взаємозв'язків між фігурами, розвитку просторового мислення та підвищенню мотивації здобувачів освіти (Rashevskaya et al., 2020).

Серед програмних рішень, що поєднують математичні функції з можливістю AR-візуалізації, вирізняється GeoGebra – динамічне інтерактивне середовище, яке поєднує геометрію, алгебру, аналіз і статистику в єдиному цифровому інструменті. З 2018 року в GeoGebra реалізовано функціонал 3D-відображення у доповненій реальності, який відкриває нові можливості для глибокого осмислення математичних моделей. Попри широке впровадження GeoGebra у шкільну освіту (Cheong et al., 2024; Ibáñez, Delgado-Kloos, 2018; Shabanova et al., 2020), питання використання цієї технології саме у підготовці фінансових фахівців лишається малодослідженим.

На сьогодні існує потреба у переосмисленні змісту та методів математичної підготовки студентів економічного профілю з урахуванням динаміки цифровізації, міждисциплінарності та ринкових запитів на цифрову грамотність. Водночас у літературі спостерігається недостатнє узагальнення прикладних кейсів використання AR у математичних дисциплінах

саме галузі управління та адміністрування, а також обмежене методичне забезпечення для викладачів коледжів.

Метою цієї статті є проаналізувати сучасний стан досліджень використання доповненої реальності в програмному середовищі GeoGebra у контексті математичної освіти, зосередивши увагу на підготовці студентів коледжів. У роботі наведено приклади застосування GeoGebra AR у різних математичних галузях (аналітичній геометрії, фінансовій математиці, просторовому моделюванні), а також запропоновано методичні підходи до ефективної інтеграції цієї технології в навчальні програми. Основні висновки дослідження свідчать про позитивний вплив GeoGebra AR на результати навчання, підвищення мотивації, формування професійних і цифрових компетентностей здобувачів освіти.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Дослідження базувалося на змішаному підході з використанням елементів педагогічного експерименту, якісного аналізу діяльності студентів та емпіричного спостереження за навчальними результатами в умовах проєктної діяльності. Метою було вивчення впливу використання цифрових інструментів GeoGebra 3D та доповненої реальності (AR) на формування просторового мислення, аналітичних умінь та навчальної мотивації студентів економічного профілю.

У дослідженні брали участь студенти спеціальності «Фінанси, банківська справа, страхування та фондовий ринок» ВСП «Фаховий коледж економіки і технологій Державного університету економіки і технологій». Загалом було охоплено 35 осіб, які були розподілені на контрольну (КГ, 17 студентів) та експериментальну (ЕГ, 18 студентів) групи.

З метою забезпечення надійності результатів експерименту далі розглянемо його методичну організацію.

Інструментарій. У дослідженні використовувалось програмне забезпечення GeoGebra 3D Calculator (мобільна та комп'ютерна версії) з інтегрованим AR-модулем. Моделі створювались у вікні 3D Графіка, після чого переносились у доповнену реальність за допомогою мобільного пристрою з камерою. Побудови здійснювались із використанням стандартного набору інструментів.

Процедура. Учасники експериментальної групи працювали над побудовою та дослідженням тривимірних моделей (призми, паралелепіпеда, зрізаного конуса, кулі, піраміди), які проєктувались в реальне середовище за допомогою AR. Кожен студент або мінігрупа виконували серію практичних завдань та мініпроєктів: «Ігровий майданчик», «Моя кімната», «Торговий павільйон», «Економна економіка».

Методи збору даних. Збір інформації здійснювався шляхом:

- анкетування студентів (до і після виконання завдань);
- аналізу виконаних моделей;
- спостереження за динамікою розвитку навичок (просторове мислення, логічні міркування, самостійність);
- порівняння результатів ЕГ і КГ у розв'язанні аналогічних задач.

Методи аналізу. Для аналізу результатів використовувались:

- порівняльна статистика (у відсотковому вираженні);
- описово-аналітичний метод для оцінювання глибини розуміння математичних понять;
- контент-аналіз моделей, створених студентами;
- якісний аналіз усвідомлення змісту математичних залежностей та рівня аргументації рішень.

Етичні аспекти. Усі учасники експерименту були проінформовані про мету дослідження та дали усну згоду на участь. Зібрані дані використовувались виключно в навчально-наукових цілях, із дотриманням принципів конфіденційності.

Запропоновані задачі та моделі є універсальними та можуть бути адаптовані для різних рівнів складності – від базової геометрії до поглиблених курсів з елементами математичного аналізу та фінансових обчислень. Такий підхід забезпечує відкритість і повторюваність

дослідження, що є важливою умовою наукової верифікації та практичної апробації результатів у ширшому освітньому контексті.

Результати (Results)

У результаті проведеного дослідження було встановлено позитивний вплив використання цифрового інструментарію GeoGebra з функцією доповненої реальності (AR) на якість навчання стереометрії студентів фінансово-економічного профілю. Зокрема, фіксувалося покращення просторового мислення, підвищення рівня розуміння геометричних властивостей об'єктів, здатність до побудови математичних моделей та розв'язання задач прикладного змісту з оптимізаційною складовою.

Активне використання AR-моделей сприяло формуванню в учасників дослідження навичок візуалізації складних фігур, логічного аналізу взаємозв'язків між параметрами тіл у просторі, а також посиленню навчальної мотивації. У ході виконання проєктних завдань студенти демонстрували здатність не лише до математичного конструювання, а й до критичної інтерпретації результатів, перевірки гіпотез і обґрунтування власних рішень.

З метою системного аналізу отриманих результатів та представлення ключових напрямів впровадження GeoGebra AR у навчальний процес, цей розділ поділено на декілька підтем. У них детально описано етапи побудови моделей, проєктну діяльність студентів, аналіз результатів опитувань та ефективність розв'язування прикладних задач у форматі педагогічного експерименту.

Побудова та дослідження моделей у середовищі GeoGebra AR

Одним із ключових напрямів дослідницької частини стало застосування інструментів доповненої реальності у програмному середовищі GeoGebra для створення математичних моделей просторових об'єктів. З метою дослідження ефективності візуалізації та просторової інтерпретації геометричних фігур, студентам було запропоновано виконати побудову призматичних тіл у середовищі GeoGebra 3D, з подальшим проєктуванням моделі в доповнену реальність (AR). Такий підхід забезпечує безпосереднє занурення у просторові структури, що сприяє глибшому розумінню геометричних властивостей і взаємозв'язків між об'єктами.

Процес побудови математичної моделі в доповненій реальності передбачає початкове створення фігури у вікні 3D Графіка за допомогою відповідних інструментів GeoGebra. Після цього студент натискає кнопку «AR», що дає змогу перенести модель у реальне середовище за допомогою камери мобільного пристрою. Наведення камери на обране місце (наприклад, стіл, підлогу, стіну) і торкання екрана дозволяє «зафіксувати» об'єкт у фізичному просторі. Далі, використовуючи сенсорне управління, користувач може змінювати масштаб, колір, а також орієнтацію фігури.

Особливу увагу було зосереджено на побудові прямокутної призми, як одного з базових стереометричних тіл, що має практичне значення в задачах на оптимізацію. Побудова реалізується в два основних етапи: створення прямокутника як основи призми та побудова самої призми на основі цієї фігури. Етап побудови прямокутника передбачає чотири послідовні кроки: побудову відрізка в площині Оху; побудову прямої, паралельної до відрізка; проведення перпендикулярів до цієї прямої через її кінцеві точки; побудову прямокутника з точок перетину. Для цього застосовуються інструменти «Вигляд з», «Відрізок», «Паралельна пряма», «Перпендикулярна пряма» та «Многокутник». При потребі зайві побудови прибираються з вкладки «Алгебра», а параметри об'єкта (колір, розмір) редагуються вручну.

Далі відбувається побудова прямокутної призми. Студент спочатку проводить перпендикуляр до площини прямокутника, що слугує напрямом «висоти» призми. Після цього за допомогою інструмента «Призма» визначається фігура як просторовий об'єкт, утворений шляхом побудови призми на заданій основі у напрямку перпендикуляра до площини. Модель, створена в GeoGebra 3D, автоматично відображає об'єм призми у відповідному полі «Алгебра», що дозволяє одразу співвідносити її з реальними або теоретичними задачами.

Після створення об'єкта віртуальна фігура переноситься у фізичний світ за допомогою функції AR. Мобільний пристрій із камерою слугує інтерфейсом доповненої реальності: користувач може обійти фігуру, «зазирнути» всередину, зіставити її з реальними об'єктами (наприклад, книжками, коробками, меблями). Такий підхід дозволяє здійснити емпіричне дослідження просторових властивостей фігури, оцінити співвідношення геометричних розмірів, пропорцій та положення в просторі (рис. 1).

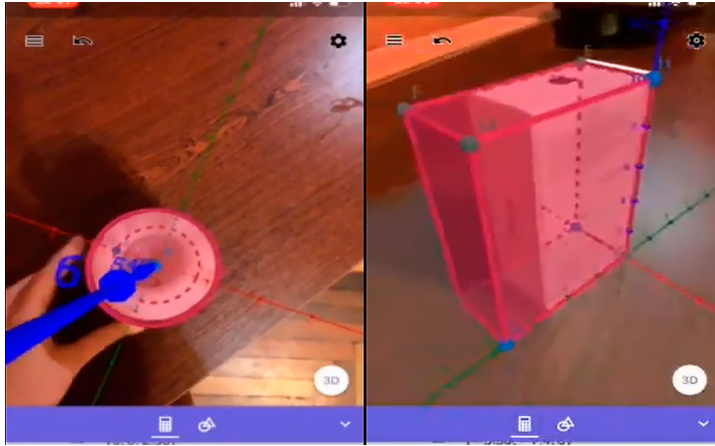


Рисунок 1. Демонстраційні програми GeoGebra AR

GeoGebra AR також дає змогу вводити у зафіксовану віртуальну фігуру реальні об'єкти у формі прямокутного паралелепіпеда, що відкриває можливості для інтерактивних навчальних експериментів. Відображення формул для обчислення об'єму або площі на екрані, можливість покрокового відкриття кожного виразу (через «Прапорці») формують у студентів логічне бачення структури обчислень та їхню залежність від параметрів фігури.

У такий спосіб реалізована в GeoGebra доповнена реальність не лише покращує просторове сприйняття, а й забезпечує цінні можливості для проведення оптимізаційних задач, вивчення властивостей подібних тіл, обчислень об'ємів і візуалізації складних геометричних зв'язків. Це, у свою чергу, позитивно позначається на розумінні студентами практичного значення математичних знань, зокрема у сфері економіки, де просторове планування, моделювання та оцінка ресурсів є важливою складовою професійної діяльності.

Проектна діяльність

Використання інформаційно-комунікаційних технологій у проектній діяльності студентів фінансово-економічного профілю не лише сприяє налагодженню ефективної комунікації між учасниками освітнього процесу, а й забезпечує можливість оперативного обміну даними, планування та виконання завдань у цифровому середовищі. ІКТ допомагають раціонально організувати процес збору, обробки та візуалізації інформації, що є особливо важливим при вирішенні математичних задач прикладного характеру. Залучення таких засобів, як GeoGebra з доповненою реальністю, сприяє не лише оптимізації управління проектом, але й забезпечує моделювання об'єктів, які відображають фінансові чи геометричні залежності у реальному або наближеному до реальності просторі (*Lainufar et al., 2021*).

Крім того, сучасні цифрові інструменти виступають не лише як платформи для інтерактивного моделювання, але й як повноцінні інструментально-вимірювальні комплекси. GeoGebra, зокрема, надає студентам можливість створювати, трансформувати та аналізувати математичні об'єкти з високим рівнем точності, вимірювати параметри моделей і здійснювати емпіричне дослідження їх властивостей. Це дозволяє формувати в студентів не лише математичні, а й аналітичні та професійно-прикладні компетентності, необхідні для діяльності у фінансовій сфері.

Завданням проекту може бути створення тривимірної моделі в додатку GeoGebra 3D ігрового майданчику, у якій основні об'єкти (гойдалки, лавки, навіси тощо) моделюються на

основі геометричних тіл – кубів, призм, конусів, сфер і пірамід (рис. 2). Робота над проектом здійснюється у малих групах (3-4 особи) й передбачає послідовне виконання таких етапів: аналіз вимог до об'єкта, побудова геометричних моделей у середовищі GeoGebra 3D, виведення моделі в доповнену реальність за допомогою мобільного пристрою та презентація результату. У рамках цього проекту студенти розвивають навички просторової уяви, оперування об'ємними формами, обчислення площ поверхонь і об'ємів, а також здобувають досвід колективного планування та оцінювання.

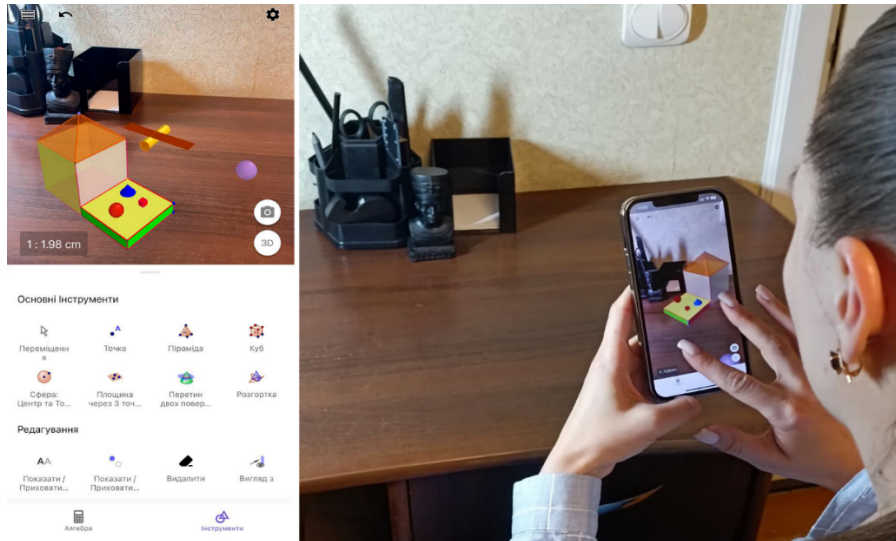


Рисунок 2. Зразок виконання проекту «Ігровий майданчик»

Оцінювання результативності є обов'язковим елементом організації роботи над проектом. Результативність проекту полягає у співвідношенні запланованих очікувань з кінцевими результатами роботи. Створені розробки можна спроектувати на подвір'ї за допомогою додатку з доповненою реальністю.

Проект «Моя кімната» має на меті відтворення інтер'єру власної кімнати або іншого обраного приміщення шляхом побудови об'єктів меблів і декору з використанням простих геометричних форм. Студенти аналізують пропорції та взаєморозміщення предметів у просторі, визначають їх приблизні розміри, підбирають колірну гаму та реалізують цифрову 3D-модель в GeoGebra. Подальше використання AR-функції дозволяє вивести модель у реальне середовище – наприклад, на поверхню парти, столу або в аудиторії – для критичного оцінювання естетики та функціональності композиції. Проект формує навички математичного моделювання, дизайнерського мислення та практичного застосування понять масштабу, симетрії, об'єму і площі.

Обидва проекти передбачають можливість варіативності та інтеграції міждисциплінарних зв'язків – зокрема, з основами фінансової грамотності (оцінка вартості матеріалів чи об'єктів), інформатикою (цифрове моделювання), технологіями (конструювання) та образотворчим мистецтвом (візуальний стиль, композиція). Участь у таких проектах сприяє глибшому засвоєнню математичних понять, підвищенню інтересу до предмета та формуванню комунікаційних і проєктних умінь, що є важливою складовою професійної підготовки студентів коледжу.

Завданням проєкту «Міні-бізнес: проєктування торгового павільйону» може бути створення тривимірної моделі мобільного торгового приміщення (наприклад, вуличної кав'ярні, кіоску або мінімагазину), яка дозволяє студентам застосувати знання з геометрії до розв'язання практичних прикладних задач, пов'язаних із розмірами, площами, об'ємами та орієнтовними витратами на будівництво. Проєкт передбачає етапи: аналіз функціонального призначення павільйону, побудова геометричних елементів моделі у GeoGebra 3D (використання тіл на основі призми, паралелепіпеда, піраміди, циліндра), розрахунок площ

поверхонь для визначення обсягів матеріалів, а також кошторисна оцінка на основі реальних цін за одиницю площі чи об'єму.

Завдяки можливості виведення моделі у доповнену реальність студенти мають змогу оцінити її масштабність, просторову відповідність і візуальну структуру безпосередньо в класному середовищі або на території закладу освіти. Підсумковим етапом є презентація проєкту з поясненням математичних обчислень, конструктивних рішень та економічного обґрунтування. За бажанням, до моделі можуть бути додані індикатори прогнозованого прибутку, точки розміщення обладнання, або міні-фінансовий план реалізації проєкту.

У контексті компетентнісного навчання та інтеграції математичних знань із реальними прикладними ситуаціями особливу педагогічну цінність становлять міжпредметні навчальні проєкти, що поєднують математику з елементами економіки, інформатики, технологій. Одним із таких проєктів є «Економна економіка», спрямований на розвиток прикладного математичного мислення у студентів коледжу, зокрема тих, хто навчається за фінансово-економічними спеціальностями.

Проєкт реалізується у форматі роботи в мінігрупах і передбачає міжпредметну інтеграцію змісту таких дисциплін, як алгебра, початки аналізу, геометрія, економіка, інформатика та креслення. У рамках цього навчального досвіду студенти отримують можливість не лише використовувати математичні методи для розв'язання задач практичного змісту, а й працювати з різноманітними цифровими інструментами – від динамічних середовищ моделювання (GeoGebra) до графічних редакторів та програм для 3D-друку. Завдяки цьому забезпечується розвиток як математичних, так і цифрових компетентностей.

Основна дидактична ідея проєкту полягає в опрацюванні прикладних задач, які, будучи сформульованими у реальному контексті, розв'язуються засобами шкільної/коледжевої математики. Задачі такого типу повинні відповідати кільком критеріям: мати практичну цінність, бути сформульованими доступною мовою без надмірної термінології, узгоджуватись зі змістом чинних навчальних програм. Особливе місце займають задачі евристичного характеру, які стимулюють творчість, гнучкість мислення, здатність переносити знання в нові ситуації, бачити знайоме в незнайомому – тобто формують основи STEM-компетентностей.

У межах проєкту студентам пропонується прикладна оптимізаційна задача: знайти розташування пішохідного переходу між двома населеними пунктами А і В таким чином, щоб маршрут пішохода був найкоротшим. У геометричній інтерпретації задача зводиться до побудови ламаної ACDB із перпендикулярним відрізком CD до заданих паралельних прямих, де мінімізується загальна довжина маршруту. Для цього застосовується програмне середовище GeoGebra, що дозволяє не лише побудувати графічну модель, а й провести інтерактивне дослідження з використанням інструменту «Прапорець» та можливості динамічного переміщення об'єктів.

Розв'язання задачі здійснюється за етапами:

1. Побудова математичної моделі – визначення умов задачі, аналіз конструктивних вимог, формулювання оптимізаційної мети;
2. Побудова графічного рішення – створення динамічної моделі у GeoGebra з можливістю зміни параметрів;
3. Математичне доведення – обґрунтування оптимальності вибраного рішення на основі властивостей симетрії та відстаней;
4. Дослідження – варіативне моделювання змінних параметрів (розташування населених пунктів, зміщення ліній), що дозволяє студентам зробити висновок про сталість структури розв'язку незалежно від положення об'єктів.

GeoGebra у цьому контексті виконує функцію як засобу побудови математичних моделей, так і віртуальної лабораторії для проведення емпіричних досліджень. Завдяки інтерактивності середовища, студенти можуть безпосередньо спостерігати вплив змінних на результат, що сприяє глибшому розумінню суті задачі, розвитку здатності до математичного експерименту й формуванню стійкої мотивації до вивчення математики.

Завершальним етапом реалізації проєкту може бути виготовлення макету маршруту або об'єкта оптимізації за допомогою підручних матеріалів або 3D-друку на основі побудованої

моделі, що ще більше підсилює практичну значущість завдання. Таким чином, проєкт «Економна економіка» поєднує математичну модель, економічну мотивацію та технічну реалізацію, виступаючи ефективним засобом формування як фахових, так і загальнопредметних компетентностей майбутніх фінансових фахівців.

Студентам Відокремленого структурного підрозділу «Фаховий коледж економіки і технологій Державного університету економіки і технологій» було запропоновано виконати мініпроєкти у GeoGebra 3D, такі як:

- проєктування ігрового майданчика;
- моделювання інтер'єру кімнати;
- міні-бізнес: проєктування торгового павільйону.

Робота велася у три етапи: планування, побудова в GeoGebra, проєкція у доповнену реальність. Проєкти оцінювалися за критеріями: математична точність, креативність, кількість використаних тіл, презентація. У ході реалізації проєктів у студентів формувалися наступні компетентності: STEM-компетентності (логіка, просторове мислення, міждисциплінарність); Soft skills (робота в групах, презентація результатів, оцінка якості).

Використання GeoGebra AR сприяло глибшому розумінню абстрактних понять, зокрема співвідношення частин тіл у просторі. Студенти ЕГ продемонстрували вищий рівень мотивації та інтересу до виконання задач, порівняно з КГ. Проєктна діяльність сприяла кращому засвоєнню термінів та методів побудови, розвитку логічного та критичного мислення.

Крім того, подібні завдання створюють сприятливе середовище для міждисциплінарної інтеграції, що особливо важливо у підготовці фінансистів, які повинні вміти застосовувати математичні інструменти для розв'язання практичних задач економічного змісту. Робота з GeoGebra AR стимулює інтерес до самостійного пізнання, формує здатність аналізувати ситуації, приймати обґрунтовані рішення в умовах змінних параметрів і моделювати реальні об'єкти у цифровому форматі.

Залучення студентів до таких проєктів дозволяє не лише поглибити знання зі стереометрії, але й забезпечує розвиток універсальних навичок ХХІ століття – комунікації, креативності, співпраці та вирішення проблем. У результаті математичне навчання набуває додаткового сенсу, такого як засобу формування аналітичного мислення, просторової уяви та професійної самореалізації здобувачів освіти в галузі управління та адміністрування.

Стереометричні задачі прикладного змісту

Геометрія, як одна з найдавніших і водночас фундаментальних галузей математики, нерідко сприймається студентами як абстрактна та відірвана від реального життя. Особливо це стосується стереометрії – розділу, що потребує розвинутого просторового мислення та візуалізації, а також розуміння взаємозв'язків між геометричними фігурами у тривимірному просторі. Відсутність прикладної спрямованості у викладанні геометрії нерідко призводить до втрати мотивації до її вивчення. Водночас залучення реалістичних задач і цифрових засобів моделювання створює умови для підвищення зацікавлення студентів та розвитку ключових компетентностей.

З метою подолання зазначених труднощів під час реалізації міждисциплінарного навчального проєкту «Економна економіка» студентам спеціальності «Фінанси, банківська справа, страхування та фондовий ринок» ВСП «Фаховий коледж економіки та технологій ДУЕТ» було запропоновано задачі прикладного змісту, що ґрунтуються на реаліях виробництва, економічної доцільності та оптимізації просторових характеристик об'єктів. Їх розв'язання передбачало застосування програмного середовища GeoGebra 3D, яке дозволяло створювати динамічні моделі, здійснювати візуалізацію умов задачі та проводити дослідження в інтерактивному форматі.

Задача 1. Скільки відсотків деревини йде у відходи при виготовленні з дерев'яної колоди, завдовжки 5 м та діаметром основ 20 см і 15 см, балки з перерізом у формі прямокутника максимальної площі поперечного перерізу?

Задача 2. Обчисліть об'єм найбільшого бруса з основою у формі прямокутника, який можна витесати з колоди циліндричної форми. Довжина колоди – 5 м, діаметр – 20 см. Який відсоток деревини при цьому піде у відходи?

Ці задачі, пов'язані з темами вписаних тіл, площ поперечного перерізу, об'ємів і залишкових матеріалів, були інтегровані в контекст оптимізації витрат матеріалів – навички, що мають безпосереднє прикладне значення для фахівців фінансово-економічного профілю. Візуалізація умов задачі та побудова моделей у GeoGebra сприяли глибшому розумінню суті математичних залежностей, дозволяли спостерігати взаємозв'язки між параметрами та оцінювати ефективність різних підходів до розв'язання.

Для перевірки ефективності такого підходу було організовано експериментальне дослідження за участі двох паралельних навчальних груп. До експериментальної групи (ЕГ) увійшли 18 студентів, які розв'язували задачі з використанням GeoGebra 3D, зокрема з динамічним переглядом побудованих моделей. У контрольній групі (КГ, 17 студентів) задачі розв'язувалися традиційним способом, за статичними ілюстраціями. Анкетування дозволило дослідити розуміння студентами геометричних понять на кожному з етапів.

На першому етапі студенти відповідали на запитання щодо фігур, які фігурують у задачі, та їх просторового розміщення. Позитивні відповіді в обох групах коливалися в межах 35–41%. Найнижчі результати спостерігалися при відповіді на ключове запитання задачі: якої форми має бути поперечний переріз балки, щоб об'єм був максимальним. У КГ позитивну відповідь дали 4 студенти (24%), в ЕГ – 3 студенти (17%).

На другому етапі, після демонстрації рисунку (на папері для КГ та у GeoGebra з динамічною побудовою для ЕГ), рівень розуміння зростає. У КГ кількість правильних відповідей збільшується до 6 (35%), тоді як в ЕГ – до 9 (50%). Аналогічна тенденція спостерігається й у питанні про відходи деревини – у КГ правильну відповідь дали 53% студентів, в ЕГ – 67%.

Динамічна побудова моделі у GeoGebra (рис. 3) включала етапи створення зрізаного конуса, побудови вписаного квадрата в меншу основу та побудови відповідної призми. Модель дозволяла змінювати параметри у режимі реального часу, досліджуючи залежність об'єму від форми перерізу.

Результати анкетування свідчать, що саме використання динамічних моделей у GeoGebra значно покращує якість розуміння задач стереометрії прикладного змісту. Такий підхід не лише формує глибше математичне бачення, але й сприяє розвитку прикладного мислення, що є критично важливим для професійної підготовки студентів.

Використання доповненої реальності в експериментальній групі дозволило значно покращити якість засвоєння навчального матеріалу. Особливу увагу приділено задачам на вписування і описування геометричних тіл, зокрема: побудова кулі, вписаної в правильну чотирикутну піраміду; використання інструментів GeoGebra 3D: Right Polygon, Segment, Intersection Point, Pyramid, Plane, Sphere тощо; візуалізація фігури в доповненій реальності за допомогою мобільного пристрою.

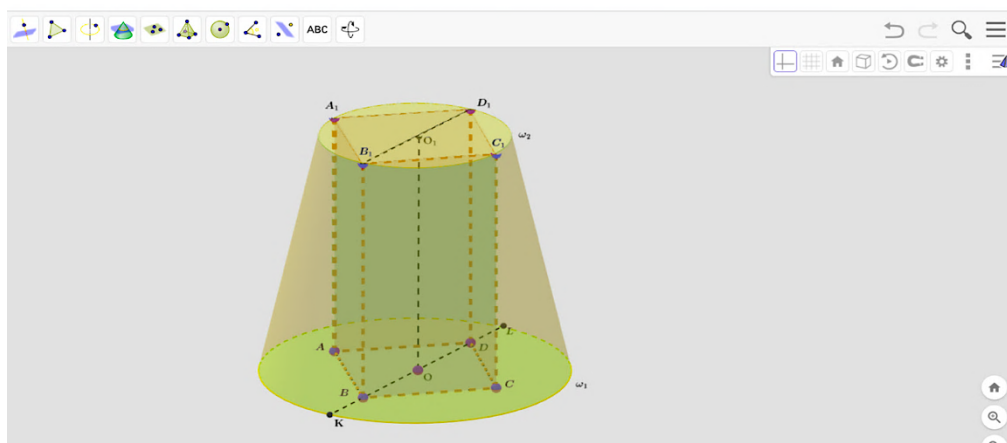


Рисунок 3. Паралелепіпед, вписаний в зрізаний конус

Результати показали, що взаємодія зі створеними AR-моделями дозволила студентам краще розуміти співвідношення між площинами, ребрами, висотами та центрами описаних/вписаних фігур, а також сформувала здатність до просторового аналізу складних геометричних конструкцій, що, у свою чергу, забезпечує глибше усвідомлення математичних залежностей і підвищує готовність до їх практичного застосування у професійній сфері.

Висновки (Conclusions)

Отримані результати експериментального дослідження підтверджують ефективність використання середовища GeoGebra 3D та технологій доповненої реальності у процесі навчання математики фахівців з фінансів. Застосування GeoGebra AR суттєво покращує розуміння просторових властивостей об'єктів, сприяє формуванню ключових математичних компетентностей і підвищує мотивацію до навчання.

Аналіз виконаних студентських мініпроектів, опрацювання прикладних стереометричних задач та результати анкетування показали, що в експериментальній групі було зафіксовано більш високий рівень засвоєння матеріалу, особливо в аспектах просторового мислення, візуалізації, логічного обґрунтування та прикладного аналізу. Робота з динамічними моделями сприяла розвитку гнучкості мислення, здатності до дослідження та перенесення знань у практичні контексти, що є важливими складовими сучасної професійної освіти.

Поєднання навчальних завдань з цифровими інструментами моделювання, інтеграція міждисциплінарного змісту та проєктна діяльність дозволили сформувати у студентів не лише математичні, а й загальнопрофесійні компетентності, пов'язані з плануванням, аналізом, комунікацією та оцінюванням ефективності рішень. GeoGebra AR є потужним засобом для трансформації традиційного навчального процесу у дослідницько-орієнтоване, технологічно збагачене середовище.

Таким чином, результати дослідження демонструють потенціал використання GeoGebra AR не лише як візуалізаційного інструменту, але й як повноцінного засобу формування глибокого розуміння математичних понять і розвитку аналітичного, критичного та інженерного мислення в контексті професійної підготовки фахівців галузі управління та адміністрування.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Література (References)

- Batubara, I. H., Saragih, S., Simamora, E., Napitupulu, E. E., Nuraini, N., Sari, D. N., Anim, A., Sari, I. P., Rahmadani, E., & Syafitri, E. (2022). Improving student mathematics communication ability through problem-based learning assisted by augmented reality based on culture. *AIP Conference Proceedings*, 2659, 5. <https://doi.org/10.1063/5.0113258>
- Cheong, K. H., Chu, C. E., Ng, W. K., & Yeo, D. J. (2024). Implementing GeoGebra 3D Calculator with Augmented Reality in multivariable calculus education. *IEEE Access*, 12, 85455–85464. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3394531>

- Garzón, J., & Acevedo, J. (2020). Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains. *Educational Research Review*, 27, 100254, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001>
- Garzón, J., Pavón, J., & Baldiris, S. (2019). Systematic review and meta-analysis of augmented reality in educational settings. *Virtual Reality*, 23(4), 447–459. <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00379-9>
- Ibáñez, M.-B., & Delgado-Kloos, C. (2018). Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Computers & Education*, 123, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.002>
- Lainufar, M., Mailizar, M., & Johar, R. (2021). Exploring the potential use of GeoGebra augmented reality in a project-based learning environment: The case of geometry. *Journal of Physics: Conference Series*, 1882(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1882/1/012045>
- Lytvynova, S., Burov, O., & Semerikov, S. (2020). Conceptual approaches to the use of augmented reality means within the educational process. *Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training: Methodology, Theory, Experience, Problems*, 55, 46–62. <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2020-55-46-62>
- Shabanova, M., Bezumova, O., Zatsepina, E., Malysheva, S., Kotova, S., & Ovchinnikova, R. (2020). Learning stereometry in a secondary school within GeoGebra's augmented reality app. *Journal of Physics: Conference Series*, 1691(1), 012115. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012115>
- Petrov, P. D., & Atanasova, T. V. (2020). *Developing Spatial Mathematical Skills Through Augmented Reality and GeoGebra*. In *ICERI2020 Proceedings* (pp. 5719–5723). ICERI. <https://doi.org/10.21125/iceri.2020.1229>
- Rashevskaya, N. V., Semerikov, S. O., Zinonos, N. O., Tkachuk, V. V., & Shyshkina, M. P. (2020). Using augmented reality tools in the teaching of two-dimensional plane geometry. In O. Y. Burov & A. E. Kiv (Eds.), *Proceedings of the 3rd International Workshop on Augmented Reality in Education, Kryvyi Rih, Ukraine, May 13, 2020* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2731, pp. 79–90). CEUR-WS.org. <https://ceur-ws.org/Vol-2731/paper03.pdf>
- Vakaliuk, T. A., & Pochtoviuk, S. I. (2021). Analysis of tools for the development of augmented reality technologies. In S. H. Lytvynova & S. O. Semerikov (Eds.), *Proceedings of the 4th International Workshop on Augmented Reality in Education (AREdu 2021), Kryvyi Rih, Ukraine, May 11, 2021* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2898, pp. 119–130). CEUR-WS.org. <https://ceur-ws.org/Vol-2898/paper06.pdf>



ECONOMIC
AND TECHNICAL
ENGINEERING

Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"

Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: ete@duet.edu.ua Journal homepage: <https://ete.org.ua>

JEL: I22, I23, I25

DOI: 10.62911/ete.2025.03.01.06

Models of Transformation of Higher Education Institutions into Entrepreneurial Universities: Typology, Algorithm, and Strategic Management

Citation:

Olesnevych, O. (2025). Models of Transformation of Higher Education Institutions into Entrepreneurial Universities: Typology, Algorithm and Strategic Management. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol. 3 No. 1 (2025), 66-72. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.01.06>

Oleksandr Olesnevych

Postgr., Kyiv national economic university named after Vadym Hetman, Kyiv, Ukraine

e-mail: o.olesnevych@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8313-6901

Received: 28/05/2025

Accepted: 04/06/2025



Abstract: Transformation of higher education institutions into entrepreneurial universities is becoming an urgent priority in the context of global competition, technological shifts, and the demand for closer integration between education, science, and the economy. This article presents a comprehensive approach to understanding and guiding such transformation, emphasizing the strategic, methodological, and organizational frameworks necessary for its implementation. The study focuses on the development of a typology of higher education institutions (HEIs) based on their level of entrepreneurial development: traditional universities, nonprofit entrepreneurial universities, and fully entrepreneurial universities. The research uses content analysis, SWOT-analysis, classification, and scenario modeling to formulate a transformation algorithm adapted to each university type. A four-phase transformation model is proposed: environmental diagnostics, strategic planning, implementation, and performance monitoring. The paper outlines specific developmental trajectories for each type of university, including resource allocation, curriculum changes, creation of innovation ecosystems, and internationalization strategies. Results demonstrate that the institutional context, readiness for innovation, and stakeholder engagement significantly influence the pace and success of transformation. The proposed model allows HEIs to transition from a classical academic structure to an entrepreneurial format, strengthening their social and economic impact. The study concludes that a systematic, typology-based approach supported by adaptive governance and strategic partnerships is essential for effective transformation. Furthermore, the framework provides practical guidance for customizing institutional strategies and aligning them with national innovation agendas. Future research may further explore how digitalization and international collaboration accelerate entrepreneurial capacity in higher education.

Keywords: university transformation, entrepreneurial university, strategic management, university typology, entrepreneurship ecosystem

JEL: I22, I23, I25

Models of Transformation of Higher Education Institutions into Entrepreneurial Universities: Typology, Algorithm, and Strategic Management

Olesnevych Oleksandr

Postgr., Kyiv national economic university named after Vadym Hetman, Kyiv, Ukraine

e-mail: o.olesnevych@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8313-6901

Abstract: The transformation of higher education institutions into entrepreneurial universities is becoming an urgent priority in the context of global competition, technological shifts, and the demand for closer integration between education, science, and the economy. This article presents a comprehensive approach to understanding and guiding such transformation, emphasizing the strategic, methodological, and organizational frameworks necessary for its implementation. The study focuses on the development of a typology of higher education institutions (HEIs) based on their level of entrepreneurial development: traditional universities, nonprofit entrepreneurial universities, and fully entrepreneurial universities. The research uses content analysis, SWOT-analysis, classification, and scenario modeling to formulate a transformation algorithm adapted to each university type. A four-phase transformation model is proposed: environmental diagnostics, strategic planning, implementation, and performance monitoring. The paper outlines specific developmental trajectories for each type of university, including resource allocation, curriculum changes, creation of innovation ecosystems, and internationalization strategies. Results demonstrate that the institutional context, readiness for innovation, and stakeholder engagement significantly influence the pace and success of transformation. The proposed model allows HEIs to transition from a classical academic structure to an entrepreneurial format, strengthening their social and economic impact. The study concludes that a systematic, typology-based approach supported by adaptive governance and strategic partnerships is essential for effective transformation. Furthermore, the framework provides practical guidance for customizing institutional strategies and aligning them with national innovation agendas. Future research may further explore how digitalization and international collaboration accelerate entrepreneurial capacity in higher education.

Keywords: university transformation, entrepreneurial university, strategic management, university typology, entrepreneurship ecosystem

Моделі трансформації закладів вищої освіти у підприємницькі університети: типологія, алгоритм та стратегічне управління

Олександр Олесневич

аспірант, ДВНЗ «Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана»

e-mail: o.olesnevych@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8313-6901

Анотація: Трансформація закладів вищої освіти у підприємницькі університети стає актуальним пріоритетом в умовах глобальної конкуренції, технологічних змін та потреби в тіснішій інтеграції освіти, науки й економіки. У статті представлено комплексний підхід до розуміння та управління таким процесом, з акцентом на стратегічні, методологічні та організаційні засади його реалізації. Основну увагу приділено розробці типології закладів вищої освіти (ЗВО) залежно від рівня розвитку підприємницького потенціалу: традиційні університети, неприбуткові університети підприємництва та повноцінні підприємницькі університети. Для формування алгоритму трансформації, адаптованого до кожного типу ЗВО, використано методи контент-аналізу, SWOT-аналізу, класифікації та сценарного моделювання. Запропоновано чотириетапну модель трансформації: діагностика зовнішнього

середовища, стратегічне планування, реалізація та моніторинг результатів. У роботі окреслено конкретні траєкторії розвитку для кожного типу університетів, включаючи розподіл ресурсів, оновлення навчальних програм, створення інноваційних екосистем та стратегії інтернаціоналізації. Результати дослідження свідчать, що інституційний контекст, готовність до інновацій та залучення стейкхолдерів істотно впливають на темпи та успішність трансформації. Запропонована модель дозволяє ЗВО перейти від класичної академічної структури до підприємницького формату, посилюючи їхній соціальний та економічний вплив. У статті зроблено висновок, що системний підхід на основі типології, підтриманий адаптивним управлінням та стратегічними партнерствами, є ключовим чинником ефективної трансформації. Крім того, запропонована рамкова модель дає практичні орієнтири для індивідуалізації інституційних стратегій та їх узгодження з національними інноваційними пріоритетами. Перспективи подальших досліджень пов'язані з вивченням впливу цифровізації та міжнародної співпраці на прискорення підприємницької трансформації у сфері вищої освіти.

Ключові слова: трансформація університету; підприємницький університет; стратегічне управління; типологія ЗВО; екосистема підприємництва.

Вступ (Introduction)

Сучасні заклади вищої освіти (ЗВО) постають перед потребою оновлення своєї ролі в суспільстві: від виключно освітньо-наукової до підприємницько-інноваційної. Поширення ідеї підприємницького університету є відповіддю на глобальні виклики, що супроводжуються швидкою зміною ринкових умов, технологічним прогресом, цифровізацією, та необхідністю активнішої інтеграції науки й освіти в економічне середовище. У цьому контексті трансформація університету в підприємницьку структуру вимагає поєднання гнучких управлінських рішень, розвитку інноваційної культури та активної участі внутрішніх і зовнішніх стейкхолдерів.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Методологічною основою дослідження трансформації закладів вищої освіти (ЗВО) у підприємницькі університети стало поєднання системного, структурно-функціонального, порівняльного та стратегічного підходів. Основні методи, використані в дослідженні:

- Контент-аналіз – застосовувався для вивчення сучасної наукової літератури, нормативно-правової бази та стратегічних документів ЗВО щодо розвитку підприємництва.
- SWOT-аналіз – дозволив ідентифікувати сильні й слабкі сторони існуючих ЗВО, а також можливості та загрози трансформаційного процесу.
- Класифікаційно-типологічний метод – використано для побудови типології університетів за рівнем розвитку підприємницької складової.
- Сценарне моделювання – застосовано для формування алгоритмів трансформації з урахуванням базових умов кожного типу університету.
- Системний підхід – забезпечив комплексне бачення взаємозв'язків між компонентами управління змінами, інституційною культурою, ресурсним забезпеченням та інноваційною діяльністю.

У рамках дослідження було сформовано концептуальну модель трансформації ЗВО, яка складається з чотирьох логічних блоків: діагностика середовища, елементи та взаємозв'язки, вимір результатів, реалізація та контроль. Для кожного блоку сформовано етапи, дії та індикатори успішності.

Результати (Results)

Поняття «підприємницький університет» виникло як відповідь на зміну ролі ЗВО у суспільстві — від традиційного освітнього закладу до активного учасника інноваційної економіки. У науковій літературі підприємницький університет визначається як інституція, що поєднує освітню, наукову та підприємницьку функції, активно залучаючись до створення інновацій, стартапів, технологічного трансферу та партнерств з бізнесом (*Clark, B. R., 1998*).

Трансформація ЗВО у підприємницький університет передбачає зміну його організаційної структури, управлінської моделі, освітнього та дослідницького контенту, а також корпоративної культури. Основні концептуальні підходи до формування підприємницького університету базуються на таких принципах:

- Інтеграція з ринком: діяльність університету має бути зорієнтована на реальні потреби економіки й суспільства, передбачаючи тісну співпрацю з бізнесом, державною владою та громадянським суспільством.
- Підприємницьке управління: перехід від централізованого до гнучкого та адаптивного управління, здатного швидко реагувати на зовнішні виклики.
- Інноваційна культура: заохочення студентів, викладачів і дослідників до створення нових продуктів, процесів і послуг; підтримка ризику й експерименту.
- Міждисциплінарність: поєднання знань з різних сфер для формування нових підходів до розв'язання прикладних задач.

Базовим елементом у моделі підприємницького університету є екосистема, яка включає наведені компонентні ті їх функціонал (таблиця 1).

Таблиця 1. Компоненти екосистеми моделі підприємницького ВНЗ

Компонент екосистеми	Функція
Бізнес-партнери	Надання зворотного зв'язку, співфінансування проектів
Інкубатори/акселератори	Підтримка стартапів, консультації, менторство
Наукові підрозділи	Генерація інноваційних рішень і технологій
Студентські ініціативи	Створення проектів, участь у бізнес-хакатонах
Державні та міжнародні програми	Фінансування інновацій та інтернаціоналізація діяльності

Таким чином, підприємницький університет — це не лише освітній простір, а й активний учасник інноваційного середовища, здатний генерувати економічну цінність і сприяти сталому розвитку суспільства.

На основі глибокого аналізу визначено три основні типи ЗВО залежно від рівня розвитку підприємницької складової:

1. Традиційний університет. Це класичні навчальні заклади, орієнтовані переважно на академічну підготовку та фундаментальні дослідження. Вони:

- не мають розвиненої підприємницької інфраструктури;
- рідко взаємодіють з бізнесом у форматі партнерства;
- не інтегрували підприємницьку освіту в навчальні програми.

Однак у них є значний потенціал для розвитку через:

- створення коворкінгів та стартап-лабораторій;
- розробку курсів з підприємництва;
- запуск менторських програм і грантових ініціатив.

2. Університет підприємництва (неприбутковий). Ці заклади вже мають певну інфраструктуру підтримки підприємництва:

- діють інкубатори, акселератори, стартап-школи;

- створено партнерства з бізнесом та локальними громадами;
- викладачі та студенти реалізують підприємницькі проекти.

Однак підприємницька функція ще не є домінантною. Основними завданнями на цьому етапі є:

- інтеграція інноваційної діяльності у всі освітні програми;
- розширення джерел фінансування;
- інтернаціоналізація підприємницьких ініціатив.

3. *Підприємницький університет.* Це університети, що повністю інтегрували підприємницьку діяльність у свою місію та функціонування:

- мають повноцінну екосистему інновацій;
- є активними гравцями на ринку інтелектуальної власності;
- підтримують стартапи, трансфер технологій, спінофи;
- формують лідерські позиції у рейтингах інноваційності.

Для таких ЗВО важливо утримувати конкурентні переваги, нарощувати глобальні зв'язки та підтримувати культуру постійних змін.

Успішна трансформація ЗВО в підприємницький університет вимагає чіткого стратегічного алгоритму, який передбачає поетапну зміну інституційної логіки, управлінських практик і культури взаємодії. Запропонований алгоритм включає чотири основні блоки:

1. *Діагностика зовнішнього середовища.* Цей блок передбачає аналіз контексту, у якому функціонує університет:

- Аналіз ринку освітніх послуг, потреб бізнесу та суспільства;
- Вивчення очікувань стейкхолдерів (студентів, викладачів, роботодавців);
- Оцінка ризиків і викликів (фінансових, соціальних, технологічних);
- Визначення конкурентних переваг університету.

Результатом має стати візія розвитку університету, узгоджена зі стратегіями національного та регіонального рівнів.

2. *Побудова стратегії.* Цей етап формує базу для трансформаційних змін:

- Визначення стратегічних пріоритетів (інновації, освіта, партнерства);
- Розробка освітньої, наукової, інноваційної стратегії;
- Формування планів реалізації стратегій (з KPI та календарем дій);
- Залучення внутрішніх і зовнішніх учасників до співтворення стратегії.

Особливо важливим є баланс між короткостроковими ініціативами і довгостроковим баченням.

3. *Реалізація трансформаційних дій.* На цьому етапі здійснюється безпосереднє впровадження змін:

- Створення підприємницької інфраструктури (коворкінги, стартап-центри, хаби);
- Впровадження підприємницьких курсів та інтеграція в освітні програми;
- Запуск акселераторів, менторських програм, конкурсів інновацій;
- Створення мережі партнерів (бізнес, органи влади, донори).

Забезпечується гнучке управління: адаптація дій відповідно до змін середовища.

4. *Моніторинг, оцінка і корекція.* Контроль за впровадженням змін базується на таких процедурах:

- Регулярне вимірювання ефективності (KPI, опитування, внутрішній аудит);
- Оцінка прогресу у досягненні цілей і оперативне коригування дій;
- Презентація результатів зацікавленим сторонам;
- Формулювання рекомендацій для майбутніх циклів трансформації.

Цей блок дозволяє інституціоналізувати інновації та забезпечити сталість змін.

Трансформація ЗВО у підприємницький університет не є одномоментним процесом. Це довготривала стратегія розвитку, яка потребує поєднання організаційних змін, переосмислення цінностей, оновлення навчального контенту, зміцнення партнерських мереж та розвитку підприємницького мислення серед усіх учасників освітнього процесу. Так, до основних факторів успішної трансформації ВНЗ у підприємницькі належать:

1. Типологічний підхід – ключ до ефективної трансформації. Традиційні ЗВО, університети підприємництва та вже підприємницькі університети мають різні стартові позиції, що потребує різних управлінських рішень. Використання типології дозволяє:

- уникнути універсалізації рішень;
- адаптувати підхід до кожного ВНЗ з урахуванням його потенціалу;
- краще розподіляти ресурси та зосередити увагу на критичних точках росту.

2. Інтеграція освітньої, наукової та підприємницької діяльності. Розрив між навчанням, дослідженнями і ринком праці знижує ефективність ЗВО. Підприємницький університет вирішує цю проблему шляхом:

- практикоорієнтованої освіти;
- проєктної діяльності;
- створення стартапів на базі наукових досліджень;
- впровадження дуальної освіти.

3. Партнерство як рушійна сила. Співпраця з бізнесом, громадським сектором, міжнародними організаціями та владою є необхідною умовою створення повноцінної підприємницької екосистеми. Це дозволяє:

- залучати зовнішні ресурси (інвестиції, менторство, інфраструктура);
- краще розуміти потреби ринку;
- адаптувати освітні програми до актуальних викликів.

4. Інноваційна культура як середовище зростання. Формування підприємницької культури передбачає:

- мотивацію до дій (гранти, конкурси, визнання);
- наявність прикладів успіху;
- підтримку ризикованих, але інноваційних ідей;
- активне залучення студентів та викладачів до реальних проєктів.

5. Роль держави. Державна політика у сфері вищої освіти має орієнтуватися на створення сприятливого середовища для підприємницької трансформації, зокрема:

- підтримку ЗВО у процесі цифровізації;
- впровадження програм фінансування інновацій;
- визнання результатів підприємницької діяльності як частини академічного успіху.

Висновки (Conclusions)

Трансформація ЗВО у підприємницький університет є складним, багатофакторним процесом, що вимагає стратегічного планування, інституційних змін та постійної взаємодії з зовнішнім середовищем. Запропонована типологія університетів (традиційний, неприбутковий університет підприємництва, підприємницький університет) дозволяє ідентифікувати поточний рівень розвитку підприємницького потенціалу кожного ЗВО та сформувати адаптовані моделі трансформації. Алгоритм трансформації включає чотири основні блоки: діагностику середовища, стратегічне планування, реалізацію змін і моніторинг. Кожен із блоків є логічним етапом у побудові підприємницького профілю ЗВО. Формування екосистеми підприємництва — критичний фактор успіху. Екосистема має включати інкубатори, акселератори, партнерства з бізнесом, підтримку стартапів, інтернаціоналізацію та інфраструктуру для практичної діяльності студентів і викладачів. Державна політика повинна підтримувати процеси трансформації через інструменти стимулювання інновацій, освітні гранти, акредитаційні механізми, що визнають підприємницьку діяльність ЗВО як індикатор їхньої якості та конкурентоспроможності. Таким чином, реалізація запропонованого підходу дозволить українським ЗВО адаптуватися до глобальних тенденцій, підвищити свою автономію, привабливість і зробити реальний внесок у розвиток інноваційної економіки країни.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Література (References)

- Clark, B. R. (1998). *Creating Entrepreneurial Universities: Organizational Pathways of Transformation*. Pergamon-Elsevier Science. <https://doi.org/10.1023/A:1003771309048>
- Etzkowitz, H. (2003). Research groups as “quasi-firms”: The invention of the entrepreneurial university. *Research Policy*, 32(1), 109–121. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00009-8)
- Struminsky, V. (2021). Transformation of Ukrainian universities in the context of innovative development. *Higher Education of Ukraine*, 2, 15–22. <https://doi.org/10.53486/icspm2023.45>
- Fedun, A., & Melnyk, V. (2020). Entrepreneurial university: Concepts, strategies, models. *Innovative Economy*, 1(83), 45–52. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(65\).2020.11089](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(65).2020.11089)
- OECD. (2017). *The Entrepreneurial University Framework*. OECD Publishing.
- Raposo, M., & Paço, A. (2011). Entrepreneurship education: Relationship between education and entrepreneurial activity. *Psicothema*, 23(3), 453–457. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2010.09.006>
- Ukrainian Institute for Education Development (UIED). (2022). *Methodological recommendations for the implementation of entrepreneurial education in higher education institutions*. Kyiv: UIED. <https://doi.org/10.20473/mkp.V33I12022.110-121>
- Landinez, L., Kliewe, T., & Garomssa, H. (2019). Entrepreneurial University Indicators in Global University Rankings. In *Developing Engaged and Entrepreneurial Universities: Theories, Concepts and Empirical Findings* (pp. 57–85). Springer. DOI: 10.1007/978-981-13-8130-0_4
- Bercovitz, J., & Feldman, M. (2006). Academic entrepreneurs and technology transfer: A conceptual framework for understanding knowledge-based economic development. *The Journal of Technology Transfer*, 31(1), 175–188. DOI: 10.1007/s10961-005-5029-z
- Fernández, A., et al. (2023). Digital transformation initiatives in higher education institutions: A comprehensive review. *Education and Information Technologies*. DOI: 10.1007/s10639-022-10739-1
- Wang, S. Y., et al. (2021). The evaluation of synergy between university–industry–government interactions: An indicator-based approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, Article 3878378. DOI: 10.1155/2021/3878378
- Bygstad, B., et al. (2022). Exploring the digital transformation of higher education: Emerging digital learning spaces. *Computers & Education*, 179, Article 104423. DOI: 10.1016/j.compedu.2022.104423



JEL: F15, L25, M21, O52

DOI: 10.62911/ete.2025.03.01.07

Business Efficiency within the Framework of the EU Single Market

Citation:

Maksymova, I., Bilyk O. (2025). Business Efficiency within the Framework of the EU Single Market. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol. 3 No. 1 (2025), 73-84. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.01.07>

Iryna Maksymova

Assoc. Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: maksimova_ii@kneu.dp.ua

 *ORCID iD: 0000-0001-9754-0414*

Taras Bilyk

Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: bilyk_ty_23794@kneu.dp.ua

 *ORCID iD: 0009-0003-3432-5145*

Abstract: The article explores the functioning of small and medium-sized enterprises within the framework of the EU Single Market, with particular attention to productivity, competitiveness, and structural challenges arising in the process of European economic integration. A comparative analysis was conducted on the productivity dynamics of enterprises of various sizes during the period 2018–2025 across selected EU industrial ecosystems. The results reveal a growing productivity gap between large enterprises and SMEs, attributed to unequal access to finance, digital technologies, market infrastructure, and innovation capacity. It was found that sectors highly sensitive to external factors (renewable energy, textiles, and tourism) exhibit significant productivity fluctuations, primarily due to seasonality, demand volatility, and regulatory shifts. In contrast, sectors such as construction, the social economy, trade, and creative industries display more stable trajectories, driven by structural inertia, strong domestic demand, and lower dependence on global supply chains. The study also analyses regional differences in the regulatory environment, particularly regarding the implementation effectiveness of EU directives. The SBA Scoreboard indicator system was employed to assess the institutional environment for SME development across Member States. The findings highlight pronounced geospatial disparities, with Austria, the Netherlands, and the Baltic states offering the most favourable conditions for SME performance, while Bulgaria and Greece face systemic challenges. A four-dimensional model of business environment efficiency is proposed, including participation in public procurement, access to finance, integration into the Single Market, and internationalisation. The study confirms that productivity serves as a systemic indicator of SME efficiency, particularly in the context of sustainable development. The research substantiates the need to reinforce SME support policies aimed at advancing digital transformation, reducing internal market barriers, fostering innovative ecosystems, and enhancing the competitiveness of SME within the integrated EU economic space.

Received: 10/09/2023

Accepted: 15/10/2023



Keywords: international business, EU Single Market, economic integration, market competitiveness, efficiency, regulatory environment, business environment, European Union, productivity, sustainable development, digitalization.

JEL: F15, L25, M21, O52

Business Efficiency within the Framework of the EU Single Market

Iryna Maksymova

Assoc. Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: maksimova_ii@kneu.dp.ua

 *ORCID iD: 0000-0001-9754-0414*

Taras Bilyk

Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: bilyk_ty_23794@kneu.dp.ua

 *ORCID iD: 0009-0003-3432-5145*

Abstract: The article explores the functioning of small and medium-sized enterprises within the framework of the EU Single Market, with particular attention to productivity, competitiveness, and structural challenges arising in the process of European economic integration. A comparative analysis was conducted on the productivity dynamics of enterprises of various sizes during the period 2018–2025 across selected EU industrial ecosystems. The results reveal a growing productivity gap between large enterprises and SMEs, attributed to unequal access to finance, digital technologies, market infrastructure, and innovation capacity. It was found that sectors highly sensitive to external factors (renewable energy, textiles, and tourism) exhibit significant productivity fluctuations, primarily due to seasonality, demand volatility, and regulatory shifts. In contrast, sectors such as construction, the social economy, trade, and creative industries display more stable trajectories, driven by structural inertia, strong domestic demand, and lower dependence on global supply chains. The study also analyses regional differences in the regulatory environment, particularly regarding the implementation effectiveness of EU directives. The SBA Scoreboard indicator system was employed to assess the institutional environment for SME development across Member States. The findings highlight pronounced geospatial disparities, with Austria, the Netherlands, and the Baltic states offering the most favourable conditions for SME performance, while Bulgaria and Greece face systemic challenges. A four-dimensional model of business environment efficiency is proposed, including participation in public procurement, access to finance, integration into the Single Market, and internationalisation. The study confirms that productivity serves as a systemic indicator of SME efficiency, particularly in the context of sustainable development. The research substantiates the need to reinforce SME support policies aimed at advancing digital transformation, reducing internal market barriers, fostering innovative ecosystems, and enhancing the competitiveness of SME within the integrated EU economic space.

Keywords: international business, EU Single Market, economic integration, competitiveness, efficiency, regulatory environment, business environment, European Union, productivity, sustainable development, digitalization.

Ефективність бізнесу в умовах Єдиного ринку ЄС

Ірина Максимова

доцент, доктор економічних наук, Державний університет економіки і технологій,

м. Кривий Ріг, Україна

e-mail: vice-rector@duet.edu.ua

 *ORCID iD: 0000-0002-4833-3694*

Тарас Білик

аспірант, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, Україна

Анотація: У статті досліджено особливості функціонування малого та середнього бізнесу в умовах Єдиного ринку Європейського Союзу, зважаючи на продуктивність, конкурентоспроможність та структурні виклики. Проведено порівняльний аналіз динаміки продуктивності бізнесу у 2018–2025 роках в межах окремих промислових екосистем ЄС. Отримані результати свідчать про зростаючий розрив між великими компаніями та малими й середніми підприємствами, який зумовлюється нерівними умовами доступу до фінансування, цифрових технологій, ринкової інфраструктури та інновацій. Виявлено, що сектори з високою чутливістю до зовнішніх чинників (відновлювана енергетика, текстиль і туризм) демонструють значні коливання продуктивності, що зумовлено сезонністю, змінами попиту та регуляторними впливами. Натомість будівництво, соціальна економіка, торгівля та креативні індустрії вирізняються стабільнішою динамікою завдяки внутрішньому попиту та меншій залежності від глобальних ланцюгів постачання. Проаналізовано передумови імплементації директив ЄС, як критерія розвитку бізнес-середовища. Застосовано індикаторну систему SBA Scoreboard для комплексної оцінки інституційного середовища розвитку МСП у державах-членах ЄС. Виявлено виразні геопросторові відмінності, зокрема найсприятливіше середовище в умовах Єдиного ринку (Астрія, Нідерланди, країни Балтії) та системно кризове (Болгарія, Греція). Запропоновано багатовимірну модель розвитку ефективності: участь у державних закупівлях, доступ до фінансування, інтеграція в Єдиний ринок та інтернаціоналізація. Доведено, що продуктивність є системним показником ефективності МСП. Обґрунтовано доцільність посилення політики підтримки МСП, орієнтованої на цифрову трансформацію, зменшення внутрішньоринкових бар'єрів, розбудову інноваційних екосистем в умовах Єдиного ринку ЄС.

Ключові слова: міжнародний бізнес, Єдиний ринок ЄС, економічна інтеграція, конкурентоспроможність, ефективність, регуляторне середовище, бізнес-середовище, Європейський Союз, продуктивність, сталий розвиток, диджиталізація.

Вступ (Introduction)

У сучасних умовах європейської інтеграції малі та середні підприємства (МСП) відіграють ключову роль у структурному укріпленні економіки Європейського Союзу (ЄС), кількісно формуючи лівову частку усіх підприємств, забезпечуючи більше половини зайнятості та значну частку валової доданої вартості (European Commission, 2025a). Водночас глибока трансформація бізнес-середовища під впливом цифровізації, енергетичного переходу та глобальних геоекономічних змін вимагає перегляду підходів до забезпечення ефективності та конкурентоспроможності цього сектору (Draghi, 2024).

Згідно з аналітичними спостереженнями за останні два десятиліття, продуктивність МСП у ЄС зростала повільніше порівняно з великими компаніями, що актуалізує дискусії щодо структурних бар'єрів, доступу до фінансування, ринкових обмежень та дефіциту цифрових і зелених компетентностей (OECD, 2023). При цьому довгострокові тренди свідчать про зростання ролі знань- та технологічно-інтенсивних галузей, де МСП демонструють вищу додану вартість на працівника та гнучкішу адаптацію до інноваційних змін (European Commission, 2025a; Eurostat, 2024).

У контексті Єдиного ринку ЄС, що залишається рушійною силою конкурентоспроможності, МСП стикаються як із новими можливостями розширення масштабів діяльності, так і з викликами фрагментації регуляторного середовища, асиметрії в доступі до цифрової інфраструктури та нерівномірності ринкових переваг між країнами-членами (European Commission, 2024a). У відповідь на це Європейська комісія стимулює інтеграцію МСП у транскордонні ланцюги створення вартості, просуває ініціативи цифрового та зеленого переходу, а також вдосконалює інструменти усунення внутрішніх бар'єрів на ринку товарів, послуг і даних (European Commission, 2024b).

Метою цієї статті є дослідження ефективності, довгострокової продуктивності та чинників конкурентоспроможності МСП в умовах функціонування Єдиного ринку ЄС з урахуванням структурних трансформацій, цифрових трендів та інституційного контексту підтримки сектора.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Методологічна основа дослідження ґрунтується на багаторівневому підході до аналізу ефективності малого та середнього підприємництва (МСП) у країнах Європейського Союзу в умовах функціонування Єдиного ринку. Враховуючи складність досліджуваного явища, поєднано кількісні методи оцінювання продуктивності з якісним аналізом регуляторного середовища та інституційних умов розвитку бізнесу.

На першому етапі здійснено компаративний аналіз показників валової доданої вартості на одного зайнятого в розрізі підприємств різного розміру (мікро-, малих, середніх та великих), що дозволило визначити відмінності у продуктивності та динаміці відновлення після кризових явищ. Джерелом даних виступили аналітичні матеріали Європейської Комісії, Eurostat та Joint Research Centre (JRC), що забезпечило високий рівень достовірності статистичних спостережень.

Другий етап передбачав секторальний аналіз темпів зростання продуктивності МСП у межах 14 визначених промислових екосистем ЄС. Розраховано річні прирости продуктивності за період 2018–2025 років, що дало змогу виявити галузі з найбільшою адаптаційною динамікою, а також ті, що зіштовхуються з інституційними або ринковими бар'єрами.

На третьому етапі проведено оцінку інституційного середовища функціонування МСП на основі індикаторів моніторингової системи SME Performance Review та SBA Scoreboard. Ця оцінка охоплювала чотири виміри: участь у державних закупівлях, доступ до фінансування, рівень інтеграції в Єдиний ринок і ступінь інтернаціоналізації. Для кожного з компонентів застосовано метод нормалізації та вагового агрегування, що дозволило сформулювати міжкраїнову шкалу порівняння. Додатково було проаналізовано темпи імплементації директив ЄС як критичний індикатор нормативної інтеграції.

Інтерпретація результатів базується на системному підході, що враховує взаємозв'язки між структурними, нормативними та економічними факторами впливу на ефективність бізнесу. Використано також принципи індексного моделювання та просторового порівняння, що дозволило визначити асиметрії між країнами-членами ЄС і окреслити рекомендації для посилення продуктивного потенціалу МСП у межах єдиного ринку.

Результати (Results)

У сучасних умовах структурної перебудови глобальної економіки продуктивність стає визначальним фактором забезпечення ефективності та конкурентоспроможності бізнесу, особливо в сегменті малого та середнього підприємництва. Як наголошується у доповіді М. Драгі (2024), економіка Європейського Союзу більше не може покладатися на демографічне зростання як традиційний рушій розвитку, оскільки низькі темпи приросту населення та старіння трудових ресурсів підривають потенціал екстенсивного економічного розширення. У цьому контексті зростання продуктивності праці визнається ключовою умовою довгострокової економічної стійкості, соціального прогресу та здатності підприємств адаптуватися до нових вимог кліматичної та цифрової трансформації (Draghi, 2024).

Особливого значення проблема продуктивності набуває в умовах функціонування Єдиного ринку ЄС, який водночас створює унікальні можливості для масштабування бізнесу та виявляє асиметрії у доступі до ресурсів, цифрових інфраструктур та регуляторних умов. МСП, як основа європейського економічного ландшафту, виявляються вразливими до цих викликів, проте водночас демонструють потенціал адаптації через гнучкість і інноваційну активність, зокрема в знаннє- та технологічно-інтенсивних секторах.

Аналіз довгострокових тенденцій продуктивності вказує на те, що впродовж 2020–2022 років відбулося відновлення ділової активності після пандемічного шоку, з поступовим зростанням рівня валової доданої вартості на одного працівника у всіх розмірних класах підприємств. Найбільш виражений прогрес спостерігався у великих компаній, які активніше впроваджували інструменти цифрової автоматизації, інновацій та управління знаннями, що забезпечило їм вищі темпи приросту продуктивності порівняно з МСП. Проте саме мікропідприємства продемонстрували відносну стабільність і здатність підтримувати позитивну динаміку навіть у періоди рецесій, що свідчить про їхню адаптивність та локалізований ефект впливу (European Commission, 2025a).

На 2024 рік прогнозується незначне уповільнення темпів зростання продуктивності, що зумовлено впливом енергетичних та фінансових обмежень, збереженням регіональних диспропорцій та затримками у впровадженні нових технологій серед МСП. Утім, 2025 рік розглядається як потенційна точка відновлення, за умови продовження політик підтримки цифрової трансформації, інтернаціоналізації та декарбонізації бізнесу. Водночас політика ЄС має бути спрямована на зменшення фрагментації внутрішнього ринку, розширення доступу до фінансових інструментів та подолання регуляторних бар'єрів, що гальмують реалізацію повного продуктивного потенціалу МСП.

Таким чином, підвищення ефективності бізнесу в ЄС в умовах сталого розвитку нерозривно пов'язане з продуктивністю як ключовим показником конкурентоспроможності. Механізми активізації продуктивності мають ґрунтуватися на принципах рівного доступу до інновацій, цифрової інфраструктури, фінансових ринків та інтеграції в транскордонні ланцюги доданої вартості.

Динаміка продуктивності МСП в ЄС порівняно з великими підприємствами характеризується відносною динамікою (рис. 1).

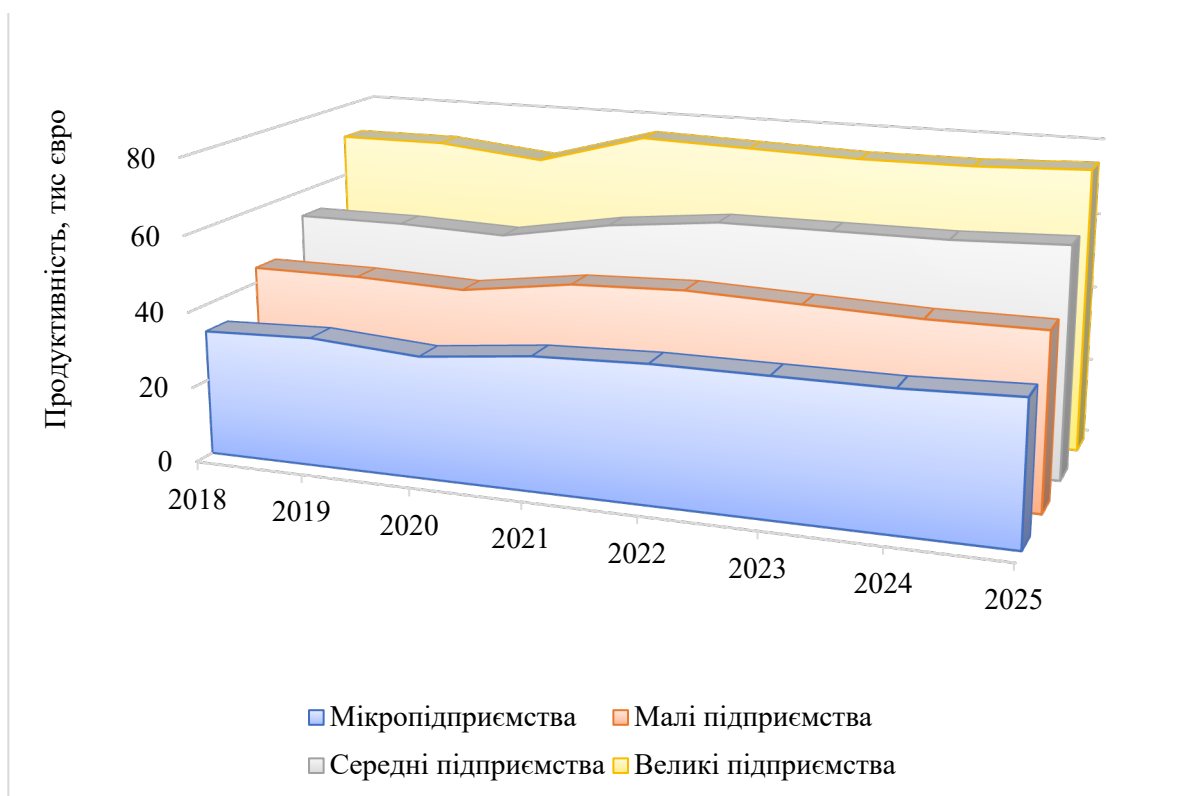


Рисунок 1. Продуктивність підприємств ЄС за групами (валова додана вартість на одного зайнятого)

Джерело: побудовано авторами на основі аналітики Joint Research Centre (2025)

Графік ілюструє відмінності у динаміці продуктивності між підприємствами різних розмірних класів у країнах Європейського Союзу. Найвищий рівень продуктивності протягом усього періоду демонструють великі підприємства — понад 70 тис. євро на одного працівника. Попри короткочасне зниження у 2020 році, спричинене пандемією, у 2021–2022 роках спостерігається стійке зростання цього показника, що свідчить про високу адаптивність великих компаній, їх здатність інвестувати в цифрові рішення, інновації та модернізацію. Середні підприємства зберігають стабільні темпи зростання, однак із помітно нижчими рівнями продуктивності — від 53 до 61 тис. євро. Цей сегмент демонструє потенціал до масштабування, але обмежений у доступі до ресурсів, зокрема фінансування інноваційної діяльності. Малі підприємства, які зазвичай мають продуктивність на рівні 44–48 тис. євро, показують помірне зростання з деякими ознаками сповільнення після 2022 року. Вразливість цього сегмента обумовлюється підвищеними витратами, складністю регуляторних процедур та нестачею спеціалізованих компетенцій. Найнижчі показники продуктивності характерні для мікропідприємств, однак саме вони демонструють найстійкішу позитивну динаміку після 2021 року. Показники продуктивності зростають з 33 до 37 тис. євро на фоні загального сповільнення у більших сегментах, що підкреслює адаптивний потенціал мікробізнесу. Ймовірною причиною є зростаюча цифрова гнучкість, активна участь у платформній економіці та зосередженість на нішевих ринках.

Особливу увагу заслуговує прогнозована динаміка на 2024–2025 роки. Згідно з оцінками, великі підприємства зберігають стабільну продуктивність на рівні 74–75 тис. євро, тоді як середні підприємства демонструють незначне зростання з 60 до 61 тис. євро. Для малих підприємств очікується зниження продуктивності до 46 тис. євро, що свідчить про втрату частини конкурентних позицій, ймовірно через інфляційний тиск, витрати на енергоресурси та обмеження доступу до фінансування. Водночас мікропідприємства єдині з-поміж усіх сегментів зберігають позитивну динаміку у 2024–2025 роках, зростаючи до 37 тис. євро. Така тенденція може вказувати на ефективність політик цифрової інклюзії та адаптацію найменших гравців до нових викликів.

Ці результати є надзвичайно важливими у контексті функціонування Єдиного ринку ЄС. Вони підтверджують, що наявні умови значною мірою сприяють підвищенню ефективності великих компаній, водночас зберігаючи бар'єри для МСП, особливо на етапах трансформації. Збереження продуктивнісного розриву вимагає поглиблення політик підтримки малого та середнього бізнесу через інструменти фінансування, спрощення регуляцій, доступ до цифрових інфраструктур та інтеграцію в інноваційні екосистеми. Особливої уваги потребують ті МСП, що функціонують у знаннє- та технологічно-інтенсивних секторах, де підвищення продуктивності прямо корелює з конкурентоспроможністю та здатністю до сталого розвитку.

Більш детальний аналіз динаміки зростання продуктивності МСП у ЄС на рівні промислових екосистем, виявляє значну варіативність між секторами та роками дослідження (рис. 2).

Як бачимо, за аналізований період простежується нерівномірна траєкторія продуктивності в різних бізнес-екосистемах. Зокрема, бізнес у галузях з підвищеним ступенем чутливості до зовнішніх впливів — такі як відновлювана енергетика, текстильна промисловість та туризм — характеризується більш вираженими коливаннями продуктивності. Це свідчить про сильну залежність цих секторів від сезонності, коливань попиту, змін у вартості ресурсів та регуляторного середовища. На відміну від них, такі екосистеми як будівництво, соціальна економіка та безпека, торгівля, а також культурні та креативні індустрії демонструють стабільнішу динаміку. Це може бути пояснено їхньою структурною інерційністю, стійкістю внутрішнього попиту та меншою залежністю від глобальних ланцюгів постачання. Умовно стабільні темпи зростання продуктивності в цих галузях створюють передумови для довгострокового планування, однак також можуть сигналізувати про повільніше впровадження інноваційних або цифрових рішень.

Аналіз оцінок продуктивності МСП у секторальному розрізі свідчить про загальнопозитивну тенденцію зростання в більшості промислових екосистем ЄС у період до 2025 року. Згідно з очікуваннями, усі екосистеми, демонструють сукупне зростання продуктивності, що вказує на відновлення та трансформаційні зрушення в економічному середовищі після кризових подій 2020 року.

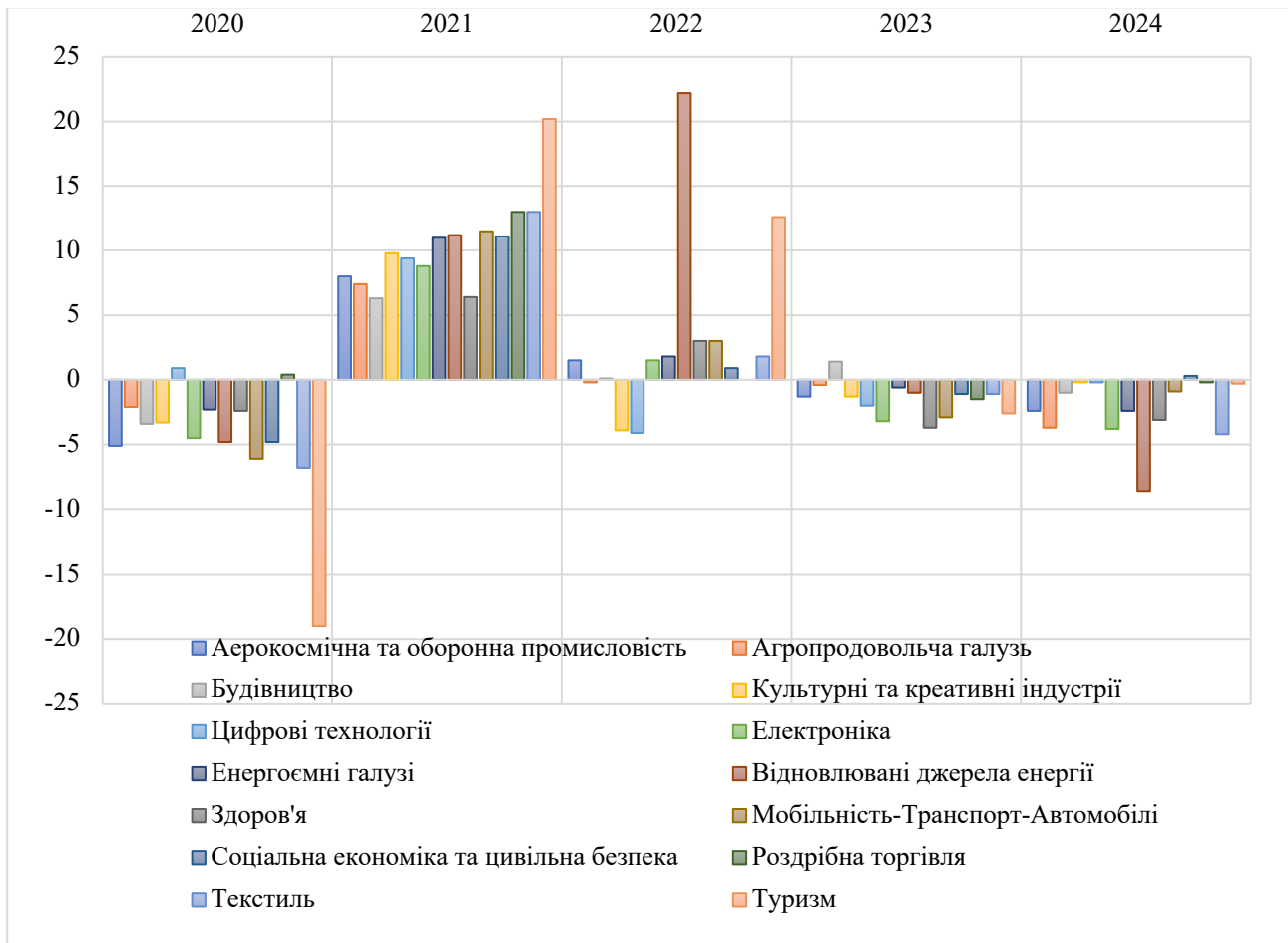


Рисунок 2. Річні темпи зростання продуктивності бізнесу за секторами діяльності МСП
Джерело: побудовано авторами на основі аналітики Joint Research Centre (2025)

Особливо виразну позитивну динаміку продемонстрували три екосистеми — роздрібна торгівля, текстильна промисловість та відновлювана енергетика — у яких передбачається двозначне зростання продуктивності до 2025 року. Зокрема, сектор відновлюваної енергетики очікувано стане лідером за приростом продуктивності МСП (21,0%), що пояснюється активною імплементацією Європейського зеленого курсу, інвестиціями в декарбонізацію та цифровізацію енергетичних систем.

Окрему аналітичну увагу заслуговують три ключові екосистеми. Продуктивність у сфері аерокосмічної та оборонної промисловості зросла лише на 2,0%, що є найнижчим результатом серед усіх галузей. Натомість енергоємні галузі демонструють приріст на 8,2%, підтверджуючи поступову модернізацію та енергоефективність як стратегічні цілі. Загалом отримані дані вказують на суттєву варіативність темпів зростання продуктивності, що зумовлена структурними особливостями кожної екосистеми, рівнем впровадження інновацій, ступенем ринкової волатильності та регуляторними умовами.

Виявлена диференціація свідчить про те, що кожна промислова екосистема стикається з унікальним набором викликів у процесі адаптації до нових ринкових умов. Ці виклики включають вплив енергетичної трансформації, цифровізації, екологічного регулювання, нестачі кадрів та інституційної підтримки. Відтак, формування ефективної політики підтримки МСП має враховувати галузеву специфіку, адаптаційний потенціал і структуру ланцюгів створення вартості в межах кожної екосистеми.

Єдиний ринок ЄС є одним із найвизначніших досягнень європейської інтеграції, адже забезпечує вільний рух товарів, послуг, капіталу та робочої сили, сприяючи зменшенню торговельних бар'єрів, гармонізації регулювання та стимулюванню зайнятості. Водночас задля збалансування ефектів лібералізації ринкового середовища Європейська Комісія

забезпечує дотримання принципів доброчесності, захисту прав споживачів та екологічної сталості. Унаслідок цього європейські підприємства, зокрема малі та середні, отримали змогу розширити масштаби своєї діяльності, водночас як конкуренція сприяла зниженню цін і розширенню асортименту для споживачів.

Оскільки МСП становлять ядро європейської економіки, функціонування Єдиного ринку справило суттєвий вплив на їхній розвиток і зростання. Проте малі підприємства, стартапи та молоді підприємці часто зіштовхуються зі значними бар'єрами, серед яких — обмежений доступ до фінансування, надмірне адміністративне навантаження, складність податкового регулювання, недостатній захист прав інтелектуальної власності та інші інституційні перешкоди. Для подолання цих викликів Європейська Комісія впровадила низку стратегічних політик, зокрема ініціативи Союзу ринків капіталу та Програми для єдиного ринку (Single Market Programme, SMP). Зазначена програма має на меті посилення конкурентоспроможності та стійкості МСП шляхом полегшення доступу до ринків, стимулювання підприємництва, розвитку навичок, підтримки індустріальної модернізації та адаптації бізнесу до глобальних і соціальних викликів.

Функціонування Єдиного ринку розглядається як ключовий параметр, що визначає ефективність МСП. З цією метою щороку здійснюється моніторинг відповідних показників у межах SME Performance Review, а також через SBA Scoreboard (інструмент оцінювання в межах Small Business Act), який охоплює 100 індикаторів, згрупованих за десятьма принципами політики. Ця система забезпечує комплексну оцінку національних підходів до підтримки МСП у державах-членах ЄС. Методика оцінювання базується на багаторівневому аналізі, з урахуванням нормалізації та вагового коефіцієнта, що дозволяє сформулювати агреговану оцінку за кожним принципом для кожної країни (рис. 3).

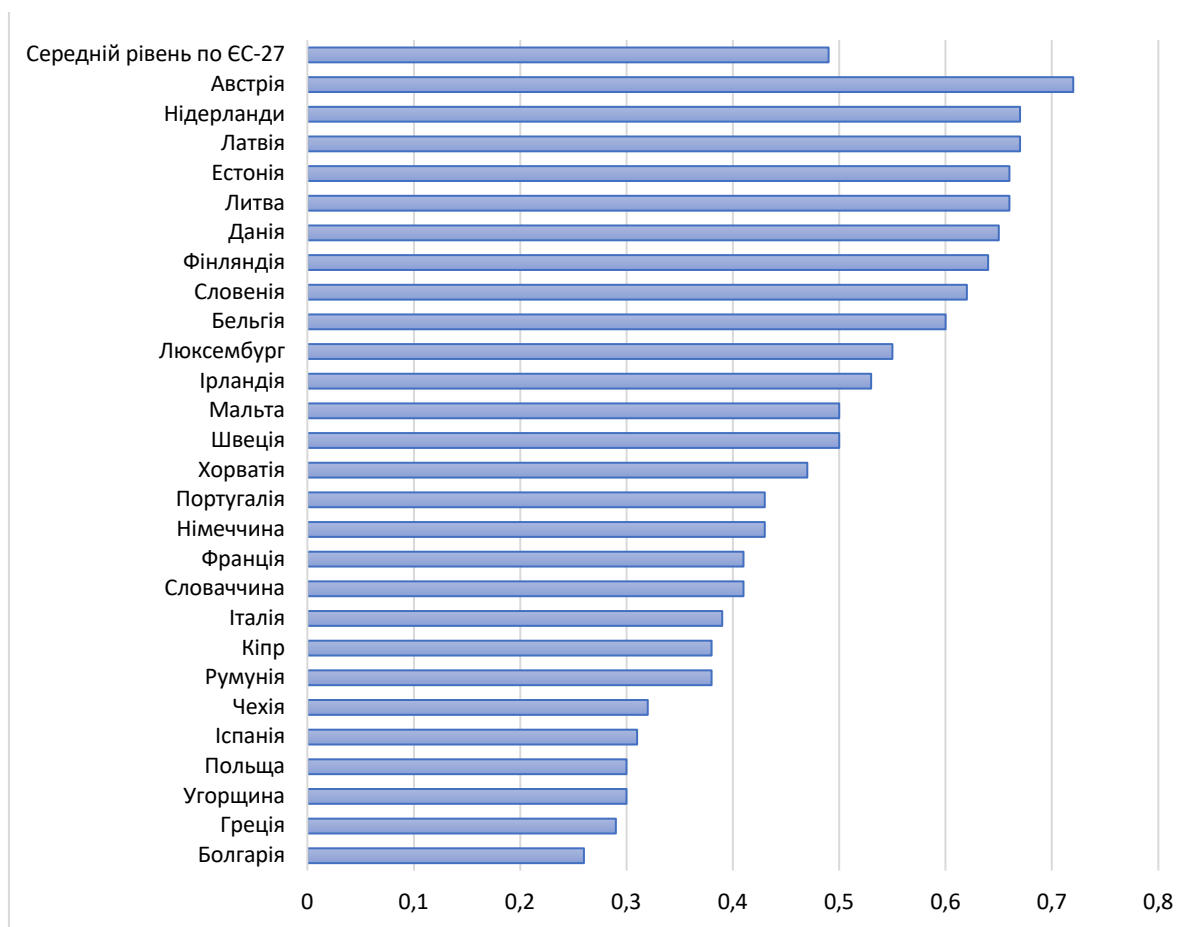


Рисунок 3. Рейтинг ефективності МСП в країнах ЄС за показником SBA

Джерело: побудовано авторами на основі аналітики Joint Research Centre (2024)

Актуальні дані щодо реалізації принципу, що стосується Єдиного ринку, виявляють виразні просторові відмінності. Зокрема, Австрія, Нідерланди та країни Балтії очолюють

рейтинг, демонструючи найсприятливіше середовище для розвитку МСП у межах Єдиного ринку. Натомість Болгарія та Греція продовжують зіштовхуватись із системними викликами, що стримують продуктивність, міжнародну інтеграцію та конкурентні переваги малого бізнесу.

Поглиблений аналіз окремих індикаторів і їхніх динамічних змін у часі дозволяє краще зрозуміти траєкторії розвитку країн-членів у межах Єдиного ринку ЄС. Одним із ключових параметрів є рівень виконання законодавчих директив, оскільки несвоєчасне повідомлення або затримка імплементації директив на національному рівні становить загрозу для функціонування та цілісності Єдиного ринку. Зростання кількості неприйнятих або негармонізованих нормативних актів свідчить про ослаблення нормативної конвергенції та ускладнює транскордонне ведення бізнесу.

Не менш важливим є й часовий аспект, а саме затримки в транспозиції директив, тобто часовий розрив між ухваленням директиви на рівні ЄС і її впровадженням у національне законодавство. Подовження таких затримок безпосередньо послаблює дієвість єдиного ринкового простору. Так, кількість прострочених директив загалом зменшувалась у країнах ЄС з 2021 року (рис. 5).



Рисунок 4. Рівень виконання директив як критерій ефективності бізнес-екосистем в країнах ЄС

Джерело: побудовано авторами на основі аналітики **Joint Research Centre (2024)**

Чотири з п'яти ключових національних економік ЄС демонструють тенденцію до скорочення цього показника. Німеччина, наприклад, стабілізувалась на рівні десяти невиконаних директив, що свідчить про стабільний, хоч і не ідеальний, рівень нормативного виконання. Водночас, середній рівень затримки транспозиції директив у ЄС, виражений у місяцях, демонструє більш волатильну динаміку. Починаючи з 2020 року, цей показник має тенденцію до зростання, що спостерігається в усіх п'яти провідних економіках ЄС, хоча й з незначними розбіжностями. Примітно, що за обома показниками — як кількістю невиконаних директив, так і середньою затримкою імплементації — Франція демонструє найкращі результати, підтверджуючи високий рівень правової інтеграції та дотримання єдиного ринкового законодавства.

У підсумку, одним із ключових аналітичних інструментів оцінки ефективності бізнес-середовища для МСП у країнах Європейського Союзу є Scoreboard SBA (Small Business Act), який охоплює низку структурних показників за принципом компаративної оцінки на основі шкали від 0 до 1, де 1 — найкращий можливий результат. В контексті даного дослідження особливу увагу приділено чотирьом визначальним принципам, що відображають стан

екосистеми для розвитку малого та середнього бізнесу в ЄС: державні закупівлі (public procurement), доступ до фінансування (access to finance), інтегрованість у Єдиний ринок (single market) та інтернаціоналізація (internationalisation).

Узагальнена таблиця демонструє середні значення по ЄС-27 для кожного з чотирьох принципів, а також кращі та найгірші результати серед країн-членів, що дозволяє виявити інституційну асиметрію та рівень просування реформ у сфері підтримки МСП (таблиця 1).

Таблиця 1. Перерізи оцінки ефективності екосистем МСП в країнах ЄС (згідно підходу SBA)

Переріз	EU-27 (середнє значення)	Найвищий показник		Найнижчий показник	
Public procurement	0,56	Литва (LT)	0,84	Швеція (SE)	0,32
Access to finance	0,58	Данія (DK), Швеція (SE)	0,73	Румунія (RO)	0,36
Single market	0,49	Австрія (AT)	0,72	Болгарія (BG)	0,26
Internationalisation	0,54	Данія (DK), Швеція (SE)	0,75	Угорщина (HU)	0,3

Джерело: сформовано авторами

Чотири вказані напрями можуть бути інтерпретовані як багатовимірна модель ефективності бізнес-середовища для МСП, яка дозволяє виявити точки зростання, дисбаланси між країнами та потенціал адаптації до нових економічних умов у межах Єдиного ринку ЄС.

За показником державних закупівель середній рівень по ЄС становить 0.56, а найкраще виконує цей принцип Литва (0.84), демонструючи ефективні механізми залучення МСП до тендерних процедур. Водночас Швеція показує найнижчий рівень — 0.32, що може свідчити про складність або обмеженість процедур для малого бізнесу.

За компонентом доступу до фінансування середнє значення по ЄС — 0.58, з найвищими оцінками у Данії та Швеції (по 0.73), що вказує на високу фінансову інклюзивність та наявність сприятливих кредитних інструментів. Найгірший результат має Румунія (0.36), що свідчить про обмеженість доступу МСП до капіталу.

Інтеграція в Єдиний ринок залишається викликом: середній рівень по ЄС — 0.49, при цьому Австрія демонструє найвищий рівень інтеграції (0.72), тоді як Болгарія має лише 0.26, що вказує на перешкоди у реалізації внутрішньоринкових можливостей.

Нарешті, інтернаціоналізація як чинник розширення бізнесу за межі національних ринків має середній показник 0.54, з найкращими результатами у Данії та Швеції (по 0.75). Найменший рівень (0.30) зафіксовано в Угорщині, що свідчить про потребу в політиках підтримки експорту та інтеграції в міжнародні ланцюги постачання.

Висновки (Conclusions)

Проведене дослідження дозволяє резюмувати такі ключові висновки.

1. У сучасних умовах ефективність бізнесу набуває багатовимірного значення, поєднуючи продуктивність, конкурентоспроможність, адаптивність до трансформацій та здатність до сталого розвитку. Вона розглядається не лише як здатність підприємств досягати економічних результатів у межах національних ринків, а як інтегрована характеристика участі у спільному європейському просторі — із доступом до цифрових інфраструктур, фінансових ресурсів, транснаціональних ланцюгів вартості та нормативної стабільності. Таким чином, ефективність МСП в контексті розвитку Єдиного ринку ЄС визначається через призму їхньої спроможності реагувати на інтеграційні виклики, використовувати переваги єдиного ринку та забезпечувати довгострокову стійкість у контексті цифрової, кліматичної та регуляторної трансформації.
2. Продуктивність визнається ключовим індикатором ефективності та конкурентоспроможності бізнесу в умовах трансформації європейської економіки. У 2020–2022 роках зафіксовано поступове відновлення рівня валової доданої вартості на одного

зайнятого, при цьому великі підприємства досягли найвищих показників (понад 70 тис. євро), тоді як мікропідприємства продемонстрували стійке зростання до 37 тис. євро, засвідчивши високий рівень адаптаційного потенціалу.

3. МСП виявляються особливо вразливими до зовнішніх шоків, структурних бар'єрів та асиметрій доступу до цифрових і фінансових ресурсів, що стримує зростання їх продуктивності. Очікуване зниження показників у малих підприємств до 46 тис. євро у 2024 році свідчить про наявність інституційних і ринкових обмежень, попри політики підтримки з боку ЄС. Водночас, темпи продуктивності МСП суттєво варіюють між секторами, демонструючи неоднорідність ефектів трансформаційних процесів у різних бізнес-екосистемах. Найвищу динаміку до 2025 року демонструють галузі роздрібної торгівлі, текстильної промисловості та відновлюваної енергетики (зростання до 21%), що зумовлено впровадженням цифрових рішень, інвестиціями в декарбонізацію та політиками Європейського зеленого курсу.

4. Функціонування Єдиного ринку супроводжується зростанням інституційної та регіональної асиметрії в доступі до бізнес-можливостей. Індекс SBA свідчить про значне розшарування між країнами-членами: Литва демонструє найвищий показник ефективності державних закупівель (0,84), тоді як Болгарія та Румунія — найнижчі значення за інтеграцією в ринок і доступом до фінансування (0,26 і 0,36 відповідно), що засвідчує потребу у цільовій регуляторній підтримці. Водночас, рівень нормативної конвергенції у межах ЄС впливає на цілісність Єдиного ринку та ефективність бізнес-середовища. Дані щодо виконання директив свідчать про збереження просторових диспропорцій. Так, Франція демонструє найвищу відповідність правовим нормам, тоді як у більшості країн спостерігаються зростаючі затримки у транспозиції, що негативно позначається на транскордонній економічній активності.

5. Запропонована у дослідженні чотиривимірна модель оцінки ефективності бізнес-середовища МСП (доступ до фінансування, участь у державних закупівлях, інтеграція в Єдиний ринок, інтернаціоналізація) дозволяє виявити структурні дисбаланси та потенційні точки зростання. Середні оцінки по ЄС-27 за цими напрямками коливаються від 0,49 до 0,58, підтверджуючи необхідність посилення політик фінансової інклюзії, цифрової трансформації та розбудови екосистем підтримки підприємництва в умовах інтеграційного простору ЄС.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримувало зовнішнього фінансування

Authors contribution

Концептуалізація, І.М.; методика, І.М.; формальний аналіз, І.М. та Т.Б.; аналітичні дані, І.М., Т.Б.; візуалізація, Т.Б., перевірка та редагування, І.М. Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Alivojvodic, V., & Kokalj, F. (2024). Drivers and barriers for the adoption of circular economy principles towards efficient resource utilisation. *Sustainability*, 16 (3), 1317. <https://doi.org/10.3390/su16031317>
- Baldassarre, B., & Calabretta, G. (2024). Why circular business models fail and what to do about it: A preliminary framework and lessons learned from a case in the European Union (Eu). *Circular Economy and Sustainability*, 4(1), 123-148. <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00279-w>

- De Pascale, A., Di Vita, G., Giannetto, C., Ioppolo, G., Lanfranchi, M., Limosani, M., & Szopik-Depczyńska, K. (2023). The circular economy implementation at the European Union level. Past, present and future. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138658. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138658>
- Draghi, M. (2024). The Future of European Competitiveness: Report to the President of the European Commission. European Commission. https://commission.europa.eu/publications/draghi-report_en
- European Commission. (2023). Progress Report on the Circular Economy Action Plan. Brussels: EC Publications.
- European Commission. (2024a). Single Market at 30: The 2024 Annual Single Market Report. Brussels: Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. <https://single-market-economy.ec.europa.eu>
- European Commission. (2024b). A Competitiveness Compass for the EU. COM(2025) 30. https://commission.europa.eu/publications/competitiveness-compass-eu_en
- European Commission. (2025a). Annual Report on European SMEs 2024/2025: SME Performance Review (JRC142263). Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/7714438>
- Eurostat. (2024). Circular economy – overview and indicators. Retrieved from: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/overview>
- Eurostat. (2024). Structural Business Statistics, Employment, and Productivity Indicators. <https://ec.europa.eu/eurostat>
- Gorokhova, T., Shpatakova, O., Toponar, O., Zolotarova, O., & Pavliuk, S. (2023). CIRCULAR ECONOMY AS AN ALTERNATIVE TO THE TRADITIONAL LINEAR ECONOMY: CASE STUDY OF THE EU. *Environmental & Social Management Journal/Revista de Gestão Social e Ambiental*, 17(5). DOI 10.24857/rgsa.v17n5-002
- Joint Research Centre (JRC). (2024). Monitoring SMEs' performance in Europe. Methodological assessment of the SBA Scoreboard 2023. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/60636>
- Joint Research Centre (JRC). (2025). Annual Report on European SMEs 2024/2025: SME Performance Review (JRC142263). Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/7714438>
- Maksymova, I., & Nastase, C. (2024). European model of climate-neutral business development based on digitalization principles. *Journal of European Economy*, 23(2), 336-352. <https://doi.org/10.35774/jee2024.02.336>
- Moreno, M. M. M., Esquinas, E. M. B., Yñiguez, R., & Puig-Cabrera, M. (2023). A global and comparative assessment of the level of economic circularity in the EU. *Journal of Cleaner Production*, 425, 138759.
- OECD. (2023). SME and Entrepreneurship Outlook 2023. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/ecd8606b-en>
- Rosa, B. O., & Paula, F. D. O. (2023). Circular economy adoption by European small and medium-sized enterprises: influence on firm performance. *Revista Brasileira de Gestão de Negócios*, 25, 421-438. <https://doi.org/10.7819/rbgn.v25i3.4232>
- Shaikh, M. B. N., Ali, M., Chaudry, U. M., & Khan, M. K. (2024). Metrics for sustainability and circular economy practices in context to modern manufacturing environment. *Circular Economy and Sustainability*, 4(3), 2073-2091. <https://doi.org/10.1007/s43615-024-00395-1>
- Shavkatov, N., Abdurakhimova, D., Sherkuziyeva, N., Omonov, S., & Rakhmedova, M. (2024). Circular economy practices and their effect on corporate financial performance. *Economic Annals-XXI*. <https://doi.org/10.21003/ea.V207-01>
- Trzcielinska, J., & Kaps, R. (2023, September). Knowledge of the Business Ecosystem and the Implementation of a Circular Economy. In *ECKM 2023 24th European Conference on Knowledge Management Vol 2*. Academic Conferences and publishing limited.
- Wandl, A., Dąbrowski, M., Berruti, G., Acke, A., Obersteg, A., Varjú, V., & Kowalczyk, M. (2023). A holistic self-assessment tool for circular economy transitions in cities and regions. *Europa XXI*, 44, 15-35. DOI 10.7163/EU21.2023.44.10



JEL: L6

DOI: -10.62911/ete.2025.03.01.08

Approaches to determining the theoretical combustion temperature of fuel in a blast furnace furnace when varying the parameters of the blowing mode

Citation:

Kassim, D., Chuprynov, Ye., Shmeltser, K., Liakhova, I. & Korenko, M. (2025). Approaches to determining the theoretical combustion temperature of fuel in a blast furnace furnace when varying the parameters of the blowing mode. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol.3 No.1 (2025), 85-94. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.01.08>

Daria Kassim

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: kassim@duet.edu.ua

 ORCID ID: [0000-0002-1750-1237](https://orcid.org/0000-0002-1750-1237)

Yevhen Chuprynov

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua

 ORCID ID: [0000-0001-8605-3434](https://orcid.org/0000-0001-8605-3434)

Kateryna Shmeltser

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

 ORCID ID: [0000-0001-6830-8747](https://orcid.org/0000-0001-6830-8747)

Iryna Liakhova

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua

 ORCID ID: [0000-0001-7589-8351](https://orcid.org/0000-0001-7589-8351)

Maryna Korenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: marinak20162010@gmail.com

 ORCID ID: [0000-0002-4582-1756](https://orcid.org/0000-0002-4582-1756)

Received: 10/06/2025

Accepted: 17/06/2025

Abstract: The study of blast furnace melting practice in a 5000 m³ furnace using pulverized coal fuel allowed us to establish the key factors that cause deformation and burnout of lances and coolers. The reasons are the asymmetry of the combustion zone in front of the lances and the violation of gas dynamics associated with the uneven supply of blast and fuel, which directly affects the temperature distribution and gas composition. The above processes, in turn, are caused by the uneven supply of blast and pulverized coal fuel to the lances, which causes variations in the theoretical combustion temperature and changes in the volume of furnace gas along the circumference and radius of the furnace. Accordingly, when determining the optimal consumption of blast additives, focusing only on the theoretical combustion temperature, as a universal indicator of the state of temperature-oxidative conditions in the lance zone, is methodologically limited. This is especially true in cases of significant changes in the initial melting parameters, when the use of standard methods does not allow to ensure the required accuracy of calculations. This work aims to create methodological principles for calculating the theoretical fuel combustion temperature, taking into account stoichiometric ratios and fuel characteristics based on the results of technical analysis, as well as actual blowing parameters in conditions of replacing part of the coke with natural gas and pulverized coal fuel. The developed method allows to determine the theoretical fuel combustion temperature in tuyeres of combustion zones when supplying natural gas and/or pulverized coal fuel, using operational information on the blowing parameters and fuel component consumption, which are recorded by automation systems and control and measuring devices on the blast furnace control panel. The introduction of this method provides the possibility of accurate calculation of the furnace gas output and theoretical combustion temperature, which is the basis for effective optimization of the blowing mode, with special emphasis on modes using pulverized coal fuel.

Keywords: blowing, blowing mode, theoretical combustion temperature, combustion zone natural gas, pulverized coal fuel, furnace gas.



JEL: L6

Approaches to determining the theoretical combustion temperature of fuel in a blast furnace furnace when varying the parameters of the blowing mode

Daria Kassim

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: kassim@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-1750-1237

Yevhen Chuprynov

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-8605-3434

Kateryna Shmeltser

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-6830-8747

Iryna Liakhova

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7589-8351

Maryna Korenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: marinak20162010@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0002-4582-1756

Abstract: The study of blast furnace melting practice in a 5000 m³ furnace using pulverized coal fuel allowed us to establish the key factors that cause deformation and burnout of lances and coolers. The reasons are the asymmetry of the combustion zone in front of the lances and the violation of gas dynamics associated with the uneven supply of blast and fuel, which directly affects the temperature distribution and gas composition. The above processes, in turn, are caused by the uneven supply of blast and pulverized coal fuel to the lances, which causes variations in the theoretical combustion temperature and changes in the volume of furnace gas along the circumference and radius of the furnace. Accordingly, when determining the optimal consumption of blast additives, focusing only on the theoretical combustion temperature, as a universal indicator of the state of temperature-oxidative conditions in the lance zone, is methodologically limited. This is especially true in cases of significant changes in the initial melting parameters, when the use of standard methods does not allow to ensure the required accuracy of calculations. This work aims to create methodological principles for calculating the theoretical fuel combustion temperature, taking into account stoichiometric ratios and fuel characteristics based on the results of technical analysis, as well as actual blowing parameters in conditions of replacing part of the coke with natural gas and pulverized coal fuel. The developed method allows to determine the theoretical fuel combustion temperature in tuyeres of combustion zones when supplying natural gas and/or pulverized coal fuel, using operational information on the blowing parameters and fuel component consumption, which are recorded by automation systems and control and measuring devices on the blast furnace control panel. The introduction of this method provides the possibility of accurate calculation of the furnace gas output and theoretical combustion temperature, which is the basis for effective optimization of the blowing mode, with special emphasis on modes using pulverized coal fuel.

Keywords: blowing, blowing mode, theoretical combustion temperature, combustion zone natural gas, pulverized coal fuel, furnace gas.

Introduction

Despite the development of alternative metallurgical technologies for direct iron production, the blast furnace still remains the main technological unit for the production of liquid iron. Given the growing shortage of coal suitable for the coking process and the improvement of environmental protection measures, the strategic task of the ferrous metallurgy of Ukraine is to reduce the level of coke consumption in the production of iron. The main role in solving this problem, as before, belongs to blast furnace production, as the main consumer of coke.

Thanks to the efforts of scientists and blast furnace technologists, blast furnace smelting technology has undergone significant improvements over the past 50 years. Thus, the specific coke consumption has decreased from 0.9 to 0.3 t/t of pig iron, and the specific blast furnace productivity has increased from 1.3 to 3.2 t/(m³·day). It is important to note that such a significant reduction in the specific coke consumption was achieved through the introduction and improvement of blast furnace smelting technology using pulverized coal fuel to replace part of the coke.

Pulverized coal fuel was first used in Eastern European plants in the 1970s. Significant results from the use of this technology have been achieved at plants in Japan, the USA, Germany, China and other countries.

In Ukraine, the operation of blast furnaces with the injection of pulverized coal fuel was started back in 1963 at the Donetsk Metallurgical Plant (DMZ). This technology went through the stages of experimental and pilot-industrial operation (1968-1978), and since 1980, on the basis of the first industrial installation in Europe, the technology of joint injection of natural gas and pulverized coal fuel into the furnace using oxygen-enriched blast was mastered, which allowed replacing up to 35% of blast furnace coke.

However, some negative aspects of this technology have already become clear today. Replacing coke with pulverized coal fuel significantly increases the requirements for the quality of iron ore charge materials (strength, fines content, iron content), coke (post-reaction strength, reactivity, ash and sulfur content, narrow fractional composition), pulverized coal fuel (ash and sulfur content, reactivity), parameters of blast and slag melting modes (oxygen content in the blast, blast temperature), devices and automation systems that provide operational technological control.

The fuel combustion temperature in the tuyeres of a blast furnace is one of the most important technological parameters of smelting. It is the initial temperature of the gas flow, on which the efficiency of using its thermal and chemical energy in the working space of the furnace depends. Given the technical complexity of continuous and direct measurement of the fuel combustion temperature in the furnace, it is currently most often calculated, thus determining the so-called theoretical (adiabatic) combustion temperature.

A number of studies (*Novokhatskii, 2018*), (*Bol'shakov, 2009*), (*Rostovskii, 1998*), (*Wu, 2011*) have shown that the theoretical fuel combustion temperature in the tuyeres of a blast furnace is one of the main generalizing indicators, based on the calculation control of which rational values of the blowing mode parameters are determined.

The process of calculating and controlling generalizing theoretical indicators that characterize the operation of the gas flow in the furnace hearth, and therefore the gas-dynamic processes along the height of the furnace, becomes particularly relevant in modern blast furnace smelting with pulverized coal fuel injection into the furnace hearth. This is explained by the fact that the technology of blast furnace smelting with pulverized coal fuel injection, despite its high efficiency, is in many cases quite complex. To eliminate the problems and technological risks of implementing the technology of blast furnace smelting with pulverized coal fuel injection, it is necessary to implement measures for full and comprehensive compensation of the negative impact on blast furnace smelting of removing a large amount of coke from the charge and feeding coal dust into the furnace, which are given in the scientific and practical literature (*Chaika 2019*).

In blast furnaces, the theoretical combustion temperature of fuel in tuyeres is calculated using approximate formulas, for example, using the empirical formula developed with the participation of specialists from the Z.I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy, which is given in the reference literature:

$$T_T = 2000 + 0,75(t_d - 1100) + 40(2,0 - \varphi + 50(\omega - 25,0) + 53(9,0 - D) - 26 KG - 4,0M, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

where ω – oxygen concentration in the blast, %; φ – humidity of the blast, %; D – natural gas consumption, % in the blast; t_d – blast temperature, $^\circ\text{C}$; KG – coke oven gas consumption, % in the blast; M – fuel oil consumption, g/m^3 of the blast.

However, according to Professor Tarakanov A.K. and co-authors (Tarakanov (2015)), this equation often gives inflated results in modern conditions, which in turn prevents blast furnace technologists from rationally increasing the theoretical temperature.

Also, approaches are proposed for calculating the theoretical combustion temperature, taking into account the elementary analysis of the injected fuel, changes in the blowing parameters and the amount of additional fuels. Thus, the theoretical combustion temperature of coke and additional fuel in a blast furnace, in the most common cases, is proposed to be determined by the formula:

$$t_T = \frac{0,9341t_b + 8208\omega - \varphi(2402 - 1,2177t_b) - (1,9322 + 2,235W^w)S_p - \dots}{1 + \omega + 2\varphi + (0,0012 + 0,0013W^w)S_p} \dots$$

$$\dots \frac{-(0,39 + 2,2175C_s^w)S_s - 2673S_g + 94,76}{+ 0,0005S_s + 2,026S_g}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

where t_b – blast temperature, $^\circ\text{C}$; ω – oxygen content in the blast, m^3/m^3 ; φ – moisture content in the blast, m^3/m^3 ; S_p , S_s , S_g – consumption of liquid, solid and gaseous fuel, m^3/m^3 ; W^w – humidity of the working fuel, units; C_s^p – carbon content in solid fuel, units.

However, it should be noted that the elemental analysis of fuel, unlike the technical one, is quite complicated, so it is carried out relatively rarely and is most often limited to conducting a technical analysis. Therefore, the coefficients of equation (2) are most often calculated on the basis of averaged data of the elemental analysis of solid and liquid fuel. Therefore, we believe that with an unstable raw material base of modern metallurgical enterprises, the use of this equation may reduce the correctness of the results obtained.

Taking into account the elemental compositions of pulverized fuel for blast furnace smelting, it is necessary to recalculate the coefficients in the calculation formulas that depend on the compositions. In particular, the carbon content in the working fuel varies from 0.5287 to 0.7979 kg/kg, ash content from 0.0634 to 0.3555 kg/kg, etc., which, naturally, requires recalculation of the coefficients included in expression (2), and therefore complicates the calculation control of the furnace operation parameters.

The theoretical combustion temperature can be determined from the well-known equation given in the textbook (Efimenko (1981)), in which all the values included in it are related to 1 kg of carbon burning in the lances:

$$T_T = 273 + \frac{9797 + m_g \cdot q_g + V_d \cdot [C_b + \varphi \cdot CH_2O] \cdot t_b - 10806 \cdot \varphi}{V_g \cdot C_g}, \text{ K}, \quad (3)$$

where 9797 – heat of combustion of coke carbon to CO, kJ/kg; m_g – natural gas consumption per 1 kg of carbon burned in the tuyeres, m^3 ; q_g – total thermal effect of transformations of gaseous fuel components in the combustion zone, kJ/ m^3 ; V_d – dry blast consumption per 1 kg of carbon burned in the tuyeres, m^3 ; t_b – blast temperature, °C; φ – blast humidity, d.u.; C_b , C_{H_2O} , C_g – heat capacity of the blast, moisture and gas, kJ/($m^3 \cdot \text{grad}$); 10806 – thermal effect of the endothermic decomposition process of 1 m^3 of moisture, kJ; V_g – total amount of gases formed in the tuyeres, per 1 kg of carbon burned in the tuyeres, m^3 .

This expression is quite widely used in theoretical calculations. However, according to Professor Lyaluk V.P. (*Lyalyuk (2019)*), in this case, the enthalpy of coke carbon entering the combustion zone and the heat transfer from combustion products to liquid smelting products are not taken into account. In addition, calculating the estimated values related to 1 kg of carbon burned in the lances is not difficult if there is a material balance, but is quite problematic in cases where it is necessary to control the value of the theoretical combustion temperature under production conditions or conduct an analysis based on production data.

According to Professor Tovarovskii I.G. (*Tovarovskii (2016)*), when determining the possible consumption of any blowing additive, it is convenient to proceed from changes in the theoretical combustion temperature, which, as a complex parameter of the blowing mode, characterizes the temperature-oxidative conditions of the transformations of fuel additives in tuyeres. In this sense, the orientation towards preserving the values of the theoretical combustion temperature tested in practice, in the event of an increase in the consumption of the additive, should be considered justified.

Therefore, as the analysis showed, modern methods for determining the theoretical combustion temperature of fuel in the blast furnace hearth are not reliable enough with significant fluctuations in the input melting conditions (additive consumption, temperature and blast flow, oxygen concentration in it).

The purpose of this work is to develop methodological approaches to determining the theoretical combustion temperature of fuel using actually controlled blowing parameters when blowing natural gas and PCI into the blast furnace furnace based on stoichiometric ratios and data from technical analysis of fuel. Deriving complex formulas for calculating the theoretical temperature and furnace gas yield when using pulverized coal fuel and natural gas together will allow determining their values when using them separately.

Materials and Methods

During the study, an analysis of data from special literary sources was conducted regarding modern ideas about the features of blast furnace smelting when pulverized coal fuel is injected into the furnace, as well as methods for calculating the theoretical combustion temperature as one of the complex indicators of the thermal state of the furnace. When developing methodological approaches to determining the theoretical combustion temperature of fuel using actually controlled blowing parameters when natural gas and PCI are injected into the furnace, stoichiometric ratios and data from technical analysis of fuel were used.

Results

The conducted studies (*Lyalyuk (2017)*) of the results of the implementation and development of the technology of blast furnace smelting with the injection of pulverized coal fuel in a blast furnace with a useful volume of 5000 m^3 of PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih" allowed us to determine the causes of frequent cases of deformation and burning of air lances and coolers, which include significant unevenness of the length of the combustion zones in front of the lances along the circumference of the furnace and irrational changes in the distribution of the gas flow along the radius of the blast furnace.

In April 2016, measurements of the pulverized coal fuel consumption by tuyeres were performed at blast furnace No. 9 with a volume of 5,000 m³ of PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih", which revealed significant unevenness in its distribution (fuel consumption between several tuyeres differed by 63%). Taking into account the above, the presence of a large unevenness in the distribution of blast flow rates by tuyeres, theoretical temperature and furnace gas output along the circumference and radius of the blast furnace hearth was also recorded.

The uneven distribution of the blast on the lances around the circumference of the blast furnace significantly affects the distribution and formation of combustion centers near the air lances in the furnace, the depth of gas flow penetration into the center of the furnace, the change in the temperature field along the radius of the furnace, the configuration and location of the cohesion zone, the chemical composition of the gas flow and the physical state of condensed materials, the unevenness of the charge convergence, the furnace profile, etc., which, in turn, affects the smoothness of the blast furnace run, its productivity, specific coke consumption and the quality of pig iron.

Thus, the implementation of the technology of pulverized coal fuel injection in a blast furnace with a volume of 5000 m³ of the enterprise "ArcelorMittal Kryvyi Rih" showed significant uncertainty in the change in the size of the combustion zones in front of the furnace lances and the distribution of the gas flow along the radius of its furnace when implementing the technology of pulverized coal fuel. This became the prerequisite for the development of a method for determining and controlling the theoretical combustion temperature and other complex indicators of air, combined blast and furnace gas for the technology of pulverized coal fuel injection into the blast furnace.

As is known, the theoretical combustion temperature of fuel is calculated as the ratio of the heat input (the sum of the enthalpy of the blast, the heat of fuel combustion, and the enthalpy of coke entering the lances) to the volume of lance gas formed and its specific heat capacity.

In general, the theoretical combustion temperature can be calculated using the equation:

$$T_m = \frac{Q_{\Sigma}}{V_g \cdot C_g}, \quad (4)$$

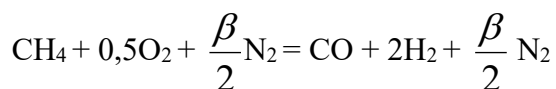
where Q_{Σ} – total heat input from fuel combustion (coke carbon, natural gas and pulverized coal fuel), kJ/s; V_g – furnace gas output, m³/s; C_g – heat capacity of furnace gas, kJ/m³·deg.

Heat generation through combustion of natural gas:

$$Q_g \cdot 1700, \text{ kJ/s},$$

where Q_g – natural gas flow rate, m³/s; 1700 – thermal effect of the combustion reaction of 1 m³ of natural gas, kJ/m³.

Considering the stoichiometric ratios, when natural gas is burned according to the reaction:



oxygen consumption of the blow:

$$\text{O}_2 \cdot \left[Q_g \cdot \left(0,5 + \frac{1 - \text{O}_2}{2\text{O}_2} \right) \right], \text{ m}^3/\text{s},$$

where β – nitrogen content in dry blast, m³/m³, O_2 – oxygen content in dry blast, m³/m³.

Accordingly, the remaining oxygen is consumed for the combustion of coke carbon and pulverized coal fuel:

$$O_2 \cdot \left[Q_b - Q_g \cdot \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2 O_2} \right) \right], \text{ m}^3/\text{s},$$

where Q_b is the normalized blast flow rate, m^3/s .

In this case, heat is released:

$$10521,9 \cdot O_2 \cdot \left[Q_b - Q_g \cdot \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2 O_2} \right) \right], \text{ kJ/s},$$

where 10521.9 is the thermal effect of burning carbon per 1 m^3 of oxygen.

The remaining oxygen burns carbon:

$$O_2 \cdot \left[Q_b - Q_g \cdot \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2 O_2} \right) \right] \cdot \frac{12}{11,2}, \text{ kg/s}.$$

Heat content of burnt carbon of coke heated to 1400 °C:

$$1400 \cdot 1,6 \cdot \left(O_2 \cdot \left[Q_b - Q_g \cdot \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2 \cdot O_2} \right) \right] \cdot \frac{12}{11,2} \right) - Y \cdot C_y, \text{ kJ/s},$$

where 1.6 is the average heat capacity of carbon at 1400 °C, $\text{kJ/kg}\cdot\text{grad}$; Y is the coal consumption, kg/s ; C_y is the average carbon content in coal, units.

Assuming the average carbon content for gas coal to be 67.0%, we obtain:

$$2240 \cdot O_2 \cdot \left[Q_b - Q_g \cdot \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2 \cdot O_2} \right) \right] \cdot \frac{12}{11,2} - 0,67 \cdot Y, \text{ kJ/s},$$

where the term $0,67 \cdot Y$ – takes into account that the coal enters the combustion zone cold.

Heat arrival with heated blast:

$$1,4 \cdot Q_d \cdot t_b, \text{ kJ/s},$$

where 1.4 is the average heat capacity of the blast in the temperature range of 1000-1200 °C, $\text{kJ/m}^3\cdot\text{degrees}$; t_b is the blast temperature, °C.

Heat is consumed for the dissociation of moisture in the blow:

$$Q_b \cdot 10806 \cdot \varphi, \text{ kJ},$$

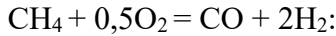
where 10806 – thermal effect of moisture dissociation, kJ/m^3 ; φ – humidity of the blast, m^3/m^3 .

The following heat is consumed for the melting and slag formation of pulverized coal ash:

$$C_{shl} \cdot A_{PCI} \cdot m_{PCI}, \text{ kJ},$$

where C_{shl} – heat capacity of slag formed during the melting of pulverized coal ash, kJ/(kg·deg) (in the subsequent calculation C_{shl} is assumed to be = 1700 kJ/(kg·deg)), A_{PCI} – ash content in pulverized coal fuel, units.

The output of furnace gas during gas combustion according to the reaction:



$$Q_g \cdot \left(3 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right).$$

Furnace gas output from the combustion of coke carbon and coal:

$$\left(2 + \frac{1 - O_2}{O_2} \right) \cdot \left[Q_b - Q_g \cdot \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] \cdot O_2, \text{ m}^3/\text{s}$$

Furnace gas output due to dissociation of blast moisture:

$$1,5 \cdot Q_b \cdot \varphi, \text{ m}^3/\text{s}.$$

Therefore, the general equation for calculating the output of furnace gas (V_f) during fuel combustion has the form:

$$V_f = Q_g \cdot \left(3 + \frac{1 - O_2}{2 \cdot O_2} \right) + \left(2 + \frac{1 - O_2}{O_2} \right) \cdot \left[Q_b - Q_g \cdot \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] \cdot O_2 + 1,5 Q_b \cdot \varphi.$$

Along with the blast furnace gas formed in the blast furnace during the combustion of carbon and hydrocarbons of the fuel and the dissociation of the moisture of the blast, volatile substances of pulverized coal fuel and nitrogen, which performs the function of a carrier gas for pulverized coal fuel, are added to the total volume of the blast furnace gas. If we assume that the composition of volatile substances released in the blast furnace furnace corresponds to the composition of coke oven gas, then the heat capacity of volatile substances can be calculated according to the data given in the reference books for calculating equipment for capturing chemical coking products. That is, the average isobaric heat capacity of the mixture of gaseous compounds released in the furnace from pulverized coal fuel in the temperature range of 800-1227 °C is 2.252 kJ/m³·degree.

Taking into account the heat capacity of gases released from volatile substances of coal, the carrier gas of pulverized coal fuel (nitrogen) and the heat consumed for slag formation from pulverized coal fuel ash, the general equation for calculating the theoretical combustion temperature when natural gas and pulverized coal fuel are injected into the furnace furnace can be presented in the following form:

$$T_T = 273 + \frac{1700 \cdot Q_{og} + 10521,9 \cdot O_2 \left[Q_{ob} - Q_{og} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] + 1,4 \cdot Q_{ob} \cdot t_b + \dots}{1,5 \cdot \left[\left(3 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) Q_{og} + \left(2 + \frac{1 - O_2}{O_2} \right) \cdot \left[Q_{ob} - Q_{og} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] O_2 + 1,5 \cdot Q_{ob} \cdot \varphi \right] + \dots} + \frac{2340 \cdot O_2 \left[Q_{ob} - Q_{og} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) - 0,67 \cdot Y \right] - 10806 Q_{ob} \cdot \varphi - C_{shl} \cdot A_{PCI} \cdot m_{PCI}}{\dots + (1,42 \cdot Q_{N_2} + 2,252 \cdot V^c) \cdot m_{PCI}}, \quad (5)$$

where 1.5 – heat capacity of furnace gas, $\text{kJ/m}^3 \cdot \text{deg}$; 1.42 – average heat capacity of nitrogen in the temperature range 100-1227 °C, $\text{kJ/nm}^3 \cdot \text{deg}$; Q_{N_2} – specific flow rate of nitrogen carrier, m^3/kg of pulverized coal fuel; 2.252 – average heat capacity of dry coke oven gas in the temperature range 800-1227 °C, $\text{kJ/nm}^3 \cdot \text{deg}$, which is determined by the gas composition and average heat capacities of the components; V^c – yield of volatile substances of coal, d.u.

In order to assess the impact of changing the GCA flow rate on the value of the theoretical combustion temperature, we performed calculations of this theoretical indicator using the equation for the operating conditions of a blast furnace with a useful volume of 1033 m^3 using the proposed equation (5).

The following actual performance indicators of blast furnace No. 1 were selected as initial parameters for the calculation: Q_b – 2021 m^3/minute ; t_b – 1067 °C; O_2 – 22.5%; φ – 0.01 m^3/m^3 ; Q_g – 75.2 m^3/t of pig iron. The following were taken as quality indicators of pulverized coal fuel: ash content (A) – 9%; volatile matter yield (V^d) – 24%; Q_{N_2} – 0.75 m^3/kg of pulverized coal fuel.

Calculations of the theoretical combustion temperature were performed when changing the pulverized coal fuel consumption from 0 to 300 kg/t of cast iron with a step of 50 kg/t of cast iron for two options for natural gas consumption: 75.2 and 0 m^3/t of cast iron. As a result of the calculations, it was found that with an increase in the consumption of pulverized coal fuel from gas coal from 0 to 300 kg/t of cast iron, the theoretical combustion temperature without natural gas injection decreases by 357 °C, at a natural gas consumption of 75.2 m^3/t – by 301 °C, which, other things being equal, corresponds to a decrease of 1.2 °C/ m^3 of natural gas and 1.0 °C/kg of pulverized coal fuel from gas coal.

Conclusions

1. Based on stoichiometric ratios and data from technical fuel analysis, methodological approaches have been developed to determine the theoretical combustion temperature of fuel based on the actually controlled blowing parameters when blowing natural gas and PCI into the blast furnace.

2. It was found that with an increase in the consumption of pulverized coal fuel from gas coal from 0 to 300 kg/t of cast iron, the theoretical combustion temperature without natural gas injection decreases by 357 °C, with a natural gas consumption of 75.2 m^3/t – by 301 °C, which, other things being equal, corresponds to a decrease of 1.2 °C/ m^3 of natural gas and 1.0 °C/kg of pulverized coal fuel from gas coal.

3. Based on the developed methodology for determining the furnace gas yield and theoretical fuel combustion temperature using actually controlled blowing parameters, it is possible to solve practical problems related to optimizing the blowing parameters of blast furnace smelting, especially when injecting pulverized coal fuel.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest

Funding

This study did not receive external funding.

Authors contribution

Conceptualization, K. D., C. Ye. and S. K.; formal analysis, S. K.; Methodology, L. I. and C. Ye.; visualization, C. Ye. and K. M.; original draft, K. D. and C. Ye.; review and editing, L. I. and K. M. All authors have read and agreed with the published version of the manuscript

References

- Bol'shakov, V.I., Murav'eva, I.G., Semenov, Y.S. et al. (2009) Predicting the thermal state of the blast-furnace hearth. *Steel Transl.*, 39, 402–405. <https://doi.org/10.3103/S096709120905009X>
- Chaika, A.L., Sokhatskii, A.A., Vasil'ev, L.E. et al. (2019) Investigation of the Influence of the Technology of Blast-Furnace Smelting with the Use of Pulverized Coal Fuel and Natural Gas on the Performance Indicators of Blast Furnaces. *Metallurgist*, 62, 1201–1212. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00775-1>
- Efimenko, G.G., Gimmel'farb, A.A., and Levchenko, V.E. (1981) *Metallurgiya chuguna* (Metallurgy of the Cast Iron), 496.
- Lyalyuk, V.P., Tarakanov, A.K., Kassim, D.A. et al. (2017) Pulverized-coal injection in a 5000-m³ blast furnace. *Steel Transl.*, 47, 675–681. <https://doi.org/10.3103/S0967091217100060>
- Lyalyuk, V.P., Tarakanov, A.K. (2019) Gas-Dynamic Assessment of Blast-Furnace Smelting. *Steel Transl.*, 49, 535–542. <https://doi.org/10.3103/S0967091219080096>
- Novokhatskii, A.M., Diment'ev, A.O. & Padalka, A.V. (2018) Theoretical Combustion Temperature in Blast Furnaces. *Steel Transl.*, 48, 593–596. <https://doi.org/10.3103/S0967091218090115>
- Rostovskii, A.V., Paren'kov, A.E. & Chernousov, P.I. (1998) Refining theoretical combustion temperature during the blow-in of a blast furnace. *Metallurgist*, 42, 474–476. <https://doi.org/10.1007/BF02511767>
- Tarakanov, A.K., Bochka, V.V., Kostomarov, A.S. (2015) Optymyzatsiya parametrov dutevoho rezhyma domennoi plavky. *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promushlennost*, 2, 11-15. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2015_2_6
- Tovarovskii, I.G., Merkulov, A.E. (2016) Features of Temperature and Concentration Fields During Pig and Cast Iron Smelting in a Blast Furnace Workspace. *Metallurgist*, 60, 589–593. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0336-1>
- Wu, Sl., Liu, Cs., Fu, Cl. et al. (2011) Improvements on Calculation Model of Theoretical Combustion Temperature in a Blast Furnace. *J. Iron Steel Res. Int.*, 18, 1–5. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60001-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60001-6)



JEL: L640

DOI: 10.62911/ete.2025.03.01.09

Laboratory studies on the effect of vibro-impact action of the screening surface on the main technological indicators of metallurgical raw material screening

Citation:

Popolov, D., Shved, S., Zaitsev, H., Henkulenko, S. & Shumylo, O. (2025). Laboratory studies on the effect of vibro-impact action of the screening surface on the main technological indicators of metallurgical raw material screening. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol. 3 No. 1 (2025), 95-105. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.01.09>

Dmytro Popolov

Assoc. Prof, PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: popolov@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0003-0347-8627

Serhii Shved

Assoc. Prof, PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shved_sv@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0003-2169-8893

Hennadii Zaitsev

PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: zaitsev@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0000-0002-7909-9044

Serhii Henkulenko

Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: henkulenko_sm_23851@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0000-0003-4629-1184

Oleh Shumylo

Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shumylo_os_23863@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0009-0001-6150-6924

Received: 28/05/2025

Accepted: 04/06/2025

Abstract: The article presents the results of a study on the effect of vibro-impact action of the screening surface on the main technological indicators of metallurgical raw material screening. The screening process is one of the key technological operations in the preparatory processes of metallurgical production, as it directly influences the quality of raw material fractionation and process productivity. The issue of screen aperture clogging significantly limits the productivity of screening, leading to a decrease in the quality of prepared charge. The purpose of the study is to investigate the effect of vibro-impact action of the screening surface on aperture clogging and the productivity indicators of metallurgical raw material screening. To achieve this goal, a laboratory model of a vibratory screener was developed, allowing for the simulation of various vibration modes of the box and studying their impact on the raw material screening process. The research methodology included a series of experiments with varying amplitude and angular frequency of box oscillations, analysis of the results using mathematical statistics methods, and the construction of mathematical models of the dependence of transportation productivity and clogging coefficient on vibration parameters. Experiments were conducted for two types of screening surfaces — fixed and freely laid, which allowed for assessing the impact of vibro-impact loads on screen aperture self-cleaning. The results showed that maximum transportation productivity is achieved at a forced oscillation amplitude of $2 \cdot 10^{-3}$ m and an acceleration of $28 \dots 32$ m/s². At the same time, the clogging coefficient significantly decreases at an amplitude of $1,8 \dots 2,2 \cdot 10^{-3}$ m and an oscillation frequency of $94,2 \dots 102$ s⁻¹. The constructed mathematical models allow predicting changes in the technological parameters of the process depending on the dynamic characteristics of the box and assist in selecting optimal operating modes for vibratory screeners. The scientific novelty of the work lies in determining the effect of vibro-impact action on the productivity of the process of screening metallurgical raw material screening and forming new approaches to reducing screen surface clogging.

Keywords: screening; vibro-impact action; screening surface; productivity; clogging; metallurgical raw materials; mathematical modeling.



JEL: L640

Laboratory studies on the effect of vibro-impact action of the screening surface on the main technological indicators of metallurgical raw material screening

Dmytro Popolov

Assoc. Prof, PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: popolov@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0003-0347-8627

Serhii Shved

Assoc. Prof, PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shved_sv@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0003-2169-8893

Hennadii Zaitsev

PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: zaitsev@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0000-0002-7909-9044

Serhii Henkulenko

Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: henkulenko_sm_23851@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0000-0003-4629-1184

Oleh Shumylo

Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shumylo_os_23863@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0009-0001-6150-6924

Abstract: The article presents the results of a study on the effect of vibro-impact action of the screening surface on the main technological indicators of metallurgical raw material screening. The screening process is one of the key technological operations in the preparatory processes of metallurgical production, as it directly influences the quality of raw material fractionation and process productivity. The issue of screen aperture clogging significantly limits the productivity of screening, leading to a decrease in the quality of prepared charge. The purpose of the study is to investigate the effect of vibro-impact action of the screening surface on aperture clogging and the productivity indicators of metallurgical raw material screening. To achieve this goal, a laboratory model of a vibratory screener was developed, allowing for the simulation of various vibration modes of the box and studying their impact on the raw material screening process. The research methodology included a series of experiments with varying amplitude and angular frequency of box oscillations, analysis of the results using mathematical statistics methods, and the construction of mathematical models of the dependence of transportation productivity and clogging coefficient on vibration parameters. Experiments were conducted for two types of screening surfaces — fixed and freely laid, which allowed for assessing the impact of vibro-impact loads on screen aperture self-cleaning. The results showed that maximum transportation productivity is achieved at a forced oscillation amplitude of $2 \cdot 10^{-3}$ m and an acceleration of $28 \dots 32$ m/s². At the same time, the clogging coefficient significantly decreases at an amplitude of $1,8 \dots 2,2 \cdot 10^{-3}$ m and an oscillation frequency of $94,2 \dots 102$ s⁻¹. The constructed mathematical models allow predicting changes in the technological parameters of the process depending on the dynamic characteristics of the box and assist in selecting optimal operating modes for vibratory screeners. The scientific novelty of the work lies in determining the effect of vibro-impact action on the productivity of the process of screening metallurgical raw material screening and forming new approaches to reducing screen surface clogging.

Keywords: screening; vibro-impact action; screening surface; productivity; clogging; metallurgical raw materials; mathematical modeling.

Лабораторні дослідження технологічних параметрів грохочення металургійної сировини при вібраційно-ударної дії сіючої поверхні

Дмитро Пополов

доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: popolov@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0003-0347-8627

Сергій Швед

доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: shved_sv@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0003-2169-8893

Геннадій Зайцев

к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: zaitsev@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0000-0002-7909-9044

Сергій Генкуленко

аспірант, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: henkulenko_sm_23851@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0000-0003-4629-1184

Олег Шумило

аспірант, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: shumylo_os_23863@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0009-0001-6150-6924

Анотація: У статті представлено результати дослідження впливу вібраційно-ударної дії сіючої поверхні на основні технологічні показники грохочення металургійної сировини. Процес грохочення є однією з ключових технологічних операцій у підготовчих процесах металургійного виробництва, оскільки він безпосередньо впливає на якість фракціонування сировини та продуктивність процесу. Проблема забивання отворів сита при грохоченні металургійної сировини значною мірою обмежує продуктивність грохочення, що призводить до зниження якості підготовленої шихти. Метою роботи є дослідження впливу вібраційно-ударної дії сіючої поверхні грохота на її забивання та показники продуктивності грохочення металургійної сировини. Для досягнення цієї мети була розроблена лабораторна модель вібраційного грохоту, що дозволяє моделювати різні режими коливань коробу та досліджувати їх вплив на процес розсіву сировини. Методика дослідження включала проведення серії експериментів із варіюванням амплітуди та кутової частоти коливань коробу, аналіз отриманих результатів із застосуванням методів математичної статистики та побудову математичних моделей залежності транспортної продуктивності та коефіцієнта забиваності від параметрів коливань. Досліди проводилися для двох варіантів сіючої поверхні – закріпленої та вільно укладеної, що дозволило оцінити вплив вібраційно-ударного навантаження на самоочищення ситових отворів. Отримані результати показали, що максимальна транспортна продуктивність досягається при амплітуді вимушених коливань $2 \cdot 10^{-3}$ м та прискоренні 28...32 м/с². Водночас коефіцієнт забиваності значно знижується при амплітуді 1,8...2,2·10⁻³ м та частоті коливань 94,2...102 с⁻¹. Побудовані математичні моделі дозволяють прогнозувати зміну технологічних параметрів процесу залежно від динамічних характеристик коробу та допомагають у виборі оптимальних режимів роботи вібраційних грохотів. Наукова новизна роботи полягає у визначенні впливу вібраційно-ударної дії на продуктивність процесу грохочення металургійної сировини і формуванні нових підходів до зменшення забиваності сіючої поверхні.

Ключові слова: грохочення; вібраційно-ударна дія; сіюча поверхня; продуктивність; забиваність; металургійна сировина; математичне моделювання.

Вступ (Introduction)

Грохочення є однією з найважливіших технологічних операцій у підготовчих процесах металургійного виробництва, оскільки значною мірою впливає на собівартість продукції під час спікання або плавлення сировинних матеріалів. Наразі для фракціонування металургійної сировини широко застосовуються різні типи інерційних грохотів, які відрізняються типорозміром, а також динамічними і кінематичними параметрами. Саме ці параметри визначають ключові технологічні показники процесу грохочення, такі як продуктивність, ефективність відсіву некондиційного продукту та ступінь забивання сіючої поверхні важкогрохотимими частинками.

Продуктивність грохочення обумовлена вимогами технологічної лінії металургійного виробництва, тоді як ефективність і забиваність сіючої поверхні залежать не лише від продуктивності, а й від оптимального вибору динамічних і кінематичних параметрів. Однак ефективність грохочення в сучасних умовах залишається недостатньою, що вимагає її підвищення. Основною проблемою є забивання сіючої поверхні, що обмежує можливість збільшення ефективності процесу на існуючих інерційних грохотах. Це зумовлено тим, що прискорення їх робочих органів обмежене діапазоном $(1,5...3)g$, що є недостатнім для сучасних вимог до фракціонування металургійної сировини.

Отже, пошук шляхів інтенсифікації процесу грохочення, спрямованих на зменшення забивання сіючої поверхні та підвищення ефективності фракціонування без втрати необхідної продуктивності, є актуальним завданням. Дослідження в цій галузі мають важливе значення для оптимізації підготовчих процесів металургійного виробництва.

Найбільш поширеними грохотами, що використовуються в гірничо-металургійній галузі для видалення дріб'язку, є центромасні машини з дебалансними віброзбудниками, працюючі в зарезонансній області. Такі машини відрізняються простотою конструкції, гарною віброізоляцією, досить високою стабільністю робочого режиму. Проте інтенсивність дії робочого органу на матеріал у таких грохотів невисока і розподілена по стадіях випадковим чином. Також випадковим чином, незалежно від властивостей матеріалу, що розсівається, прийняті кінематичні параметри робочого органу. У роботах (*Biletskyi, et al., 2019, KVMSH plius. 2025, Metso, 2025, Sokur et al., 2020, Zavod promysloвого obladnannia «Prohres», 2025*) наведені основні конструктивні та динамічні параметри, а також технологічні показники найбільш поширених грохотів.

З даних, наведених досліджень випливає, що частота коливань змінюється від 73 до 96 s^{-1} ; амплітуда коливань – від 3 до 6 мм; кут вібрації – від 30° до 50° ; кут нахилу сит – від 0° до 18° ; питома продуктивність – від 40 до 60 $t/год \cdot m^2$; питома металоємність – від 400 до 3600 $кг/m^2$; питома потужність – від 2 до 7,2 $кВт/m^2$.

Аналіз ступеня захащеності сіючої поверхні від прискорень її коливань дуже добре розкрит в роботі (*Zelov, 1986*), де виявлено, що ступінь її забивання сягає від 58 до 70 % при прискореннях, які становлять 26...32 m/s^2 . Таким чином, ефективність грохочення залишається надто низькою — від 28 до 50 %, що не задовольняє сучасні вимоги та не дає можливості належним чином підготувати шихтові матеріали до спікання та плавки, оскільки за результатами роботи (*Uchitel. A., 1992*) доведено, що суттєве зростання технологічних показників доменних печей може бути досягнуто, якщо вона становитиме не менше 70...75 %.

Такий показник можливо досягнути у випадку зменшення забивання отворів сіючої поверхні, якщо надати їй достатньо велике прискорення, згідно даних роботи (*Uchitel, S. et al., 2014*) вони повинні становити, як показано на рис. 1, для фракції агломерату 5 мм – 54 m/s^2 .

Однак, реалізація таких прискорень можлива при коефіцієнті режиму роботи вібраційної машини $(5,5...6,2)g$ що значно перевищує рекомендоване значення у $(1,5...3)g$ при проектуванні вібраційних машин (*Uchitel, A. et al., 1998*), такі високо динамічні режими призводять до значного зниження надійності основних робочих елементів та веде до росту метало- та енергоємності в цілому процесу грохочення металургійних сировинних матеріалів.

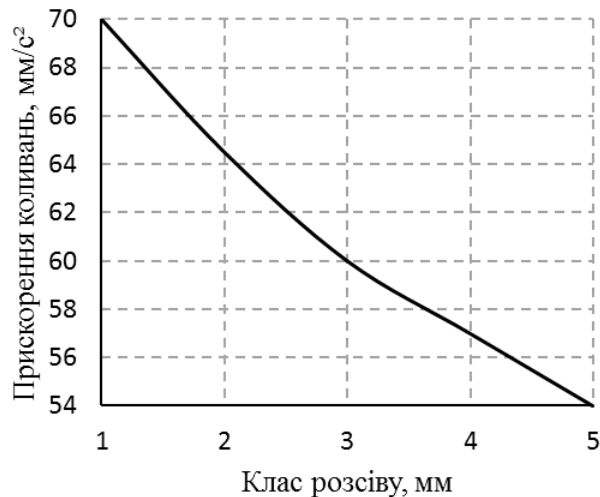


Рисунок 1. Залежність величини прискорень, що забезпечують незабиваність отворів сіючої поверхні від класу розсіву агломерату

Джерело: створено авторами

Отже, проведення досліджень, які направлені на виявлення інтенсифікації процесу грохочення металургійної сировини перед спіканням та плавкою шляхом впливу вібраційно-ударного навантаження, цілком обґрунтовано і є важливим науковим завданням.

Мета і завдання досліджень полягає в дослідженні впливу вібраційно-ударної дії сіючої поверхні грохота на її забивання та показники продуктивності грохочення металургійної сировини.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Для дослідження впливу вібраційно-ударної дії на технологічні показники грохоту була розроблена лабораторна модель, яка наведена на рис. 2.

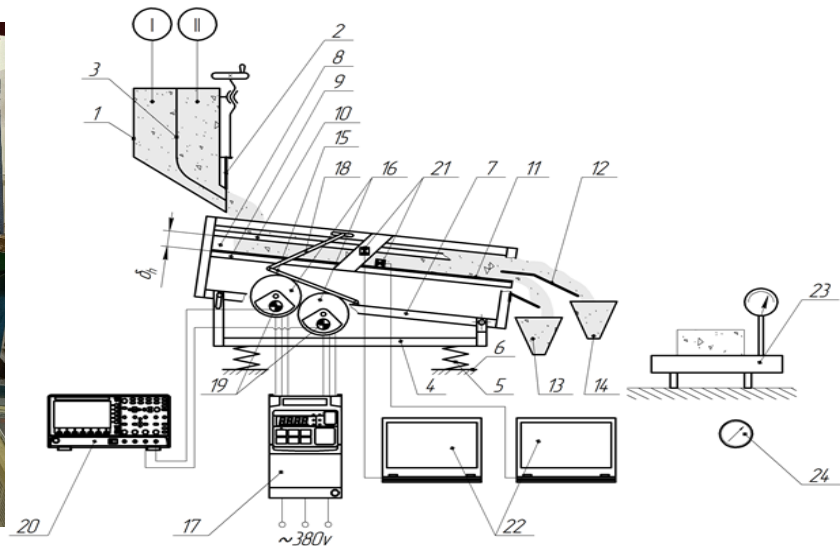
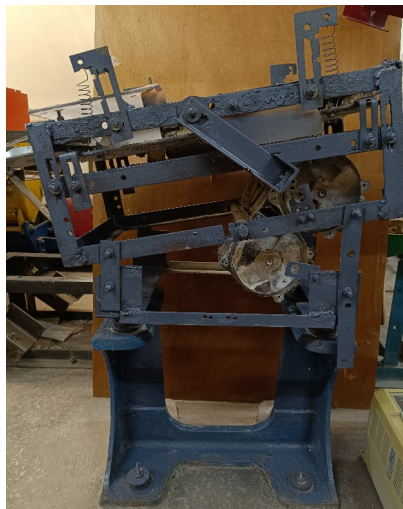


Рисунок 2. Структурна схема лабораторного стану: 1 - бункер; 2 - шиберний затвор; 3 - перегородка; 4 - лафет; 5 - пружинні опори; 6 - фундамент; 7 - рама; 8 - короб; 9 - нерухомий опорний кутник; 10 - рухомий опорний кутник; 11 - сіяча поверхня; 12 - дільний ніж; 13, 14 - приймальний бункер; 15 - підвібраторна плита; 16 - мотор-вібратор; 17 - частотний перетворювач; 18 - тяга; 19 - фазовий датчик; 20 - осцилограф; 21 - датчик прискорення; 22 - лептоп; 23 - електронні ваги; 24 - секундомір

Джерело: створено авторами

В якості параметрів оптимізації, які найбільш повно відображають технологічну ефективність вібраційного грохоту, були прийняті: транспортна продуктивність та забиваність сіючої поверхні.

В ролі факторів були прийняті параметри, що повною мірою характеризують стан динамічної системи — кутова частота вимушених коливань коробу ($\omega = 94,2 \text{ с}^{-1}$; $\omega = 125,6 \text{ с}^{-1}$; $\omega = 157 \text{ с}^{-1}$) та їх амплітуда ($A = 0,001 \text{ м}$; $A = 0,002 \text{ м}$; $A = 0,003 \text{ м}$).

Кут нахилу сіючої поверхні до горизонту та кут вібрації до нормалі, проведеної до опорної поверхні підситника в подовжній площині, на всьому діапазоні значень факторів були сталими і дорівнювали відповідно $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 45^\circ$.

Дослідження проводились при направлених коливаннях коробу з закріпленою та вільно укладеною сіючою поверхнею.

При проведенні експериментів використовувались методи математичної обробки їх результатів згідно вимог теорії математичної статистики (Zaselskyi, et al., 2019).

Транспортна продуктивність визначалась при використанні суцільного днища 11 (див. рис. 2) при відсутності ділильного ножа 12 шляхом оцінки часу заповнення $t_{\text{зап}}$ приймального бункера 13 масою матеріалу $m_{\text{тр}}$, що транспортувався, за формулою

$$Q_{\text{тр}} = \frac{m_{\text{тр}}}{t_{\text{зап}}} \text{ кг/с. (1)}$$

Досліди проводилися при постійній висоті шару матеріалу $H_{\text{ш}} = 60 \text{ мм}$, що транспортувався, варіюючи кутовою частотою вимушених коливань коробу та їх амплітудою, при певному поєднанні факторів досліди повторювались тричі.

В якості матеріалу використовувався вапняк фракцією 1,6...3 мм з вологістю до 3 %.

Визначення забиваності сіючої поверхні виконувалось за допомогою коефіцієнта забиваності, який визначався за формулою

$$K_{\text{заб}} = \frac{S_{\text{заб}}}{S_{\text{ж.п}}} \cdot 100 \%, (2)$$

де $S_{\text{заб}}$ — площа забитих отворів сіючої поверхні, м^2 ; $S_{\text{ж.п}}$ — площа живого перетину сіючої поверхні, м^2 .

Встановлення картини забиваності сіючої поверхні виконувалось шляхом її фотографування після проведення досліду для кожної пари значень динамічних параметрів коробу, який здійснював направлення гармонійно стійкі коливання при закріпленому та вільно укладеному ситі.

В якості матеріалу використовувався відсів агломерату, гранулометричний склад якого підбирався з умови максимальної забиваності апертури сіючої поверхні. Для сіючої поверхні з апертурою круглої форми діаметром 5 мм застосовувалась фракція 5...6 мм. Досліди проводились при постійному питомому навантаженні по вихідному живленню, підтримуючи постійність висоти шару шихти у 60 мм.

Результати (Results)

На рис. 3 наведено залежності транспортної продуктивності від амплітуди та кутової швидкості коливань коробу з закріпленою та вільно укладеною сіючою поверхнею.

З рисунку видно, що в досліджуваній області визначення функції транспортна продуктивність має стійку залежність від амплітуди коливань коробу та кутової частоти, а функціональна залежність має екстремальний характер. Зважаючи на те, що при однакових

динамічних параметрах коробу транспортна продуктивність грохоту з закріпленою сіючою поверхнею перевищує продуктивність вібраційно-ударної машини з невтримним зв'язком між коробом і ситом підтверджує той факт, що необхідну швидкість транспортування матеріалу, який розсівається, слід забезпечувати шляхом більшого кута нахилу сіючої поверхні в зв'язку з особливостями режиму її галоупання.

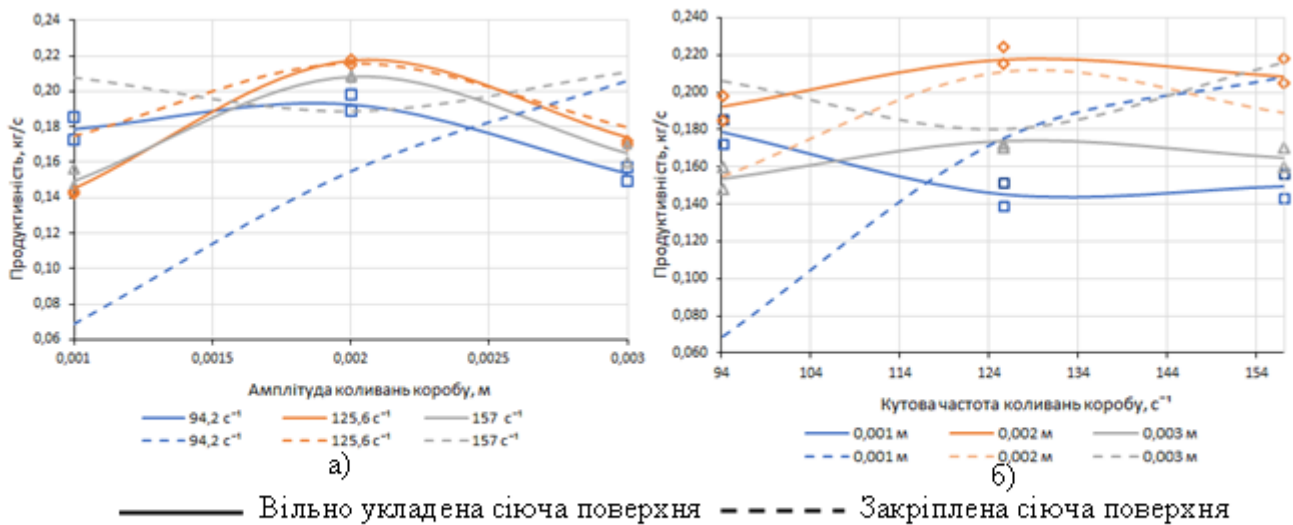


Рисунок 3. Залежність транспортної продуктивності від амплітуди (а) та кутової частоти (б) коливань коробу

Джерело: створено авторами

Відмінний характер функціональних залежностей транспортної продуктивності грохоту з закріпленою та вільно укладеною сіючими поверхнями свідчить про неможливість адаптування існуючих теоретичних моделей оцінки транспортної продуктивності шляхом визначення поправних коефіцієнтів. Тому для вивчення впливу обраних факторів на транспортну продуктивність вібраційно-ударної машини з невтримним зв'язком між коробом і ситом був проведений повний факторний експеримент, в якому реалізовано ортогональну план-матрицю другого порядку.

Математичний опис залежності транспортної продуктивності від обраних факторів здійснювався за допомогою квадратичного рівняння регресії, яке було отримане, після перевірки його на адекватність за допомогою критерія Фішера, у вигляді

$$Q_{\text{тр}} = 0,0154 + 78 \cdot A + 0,0015 \cdot \omega + 0,5732 \cdot A \cdot \omega - 34000 \cdot A^2 - 9,94 \cdot 10^{-6} \cdot \omega^2 \text{ кг/с, (3)}$$

де A – амплітуда вимушених коливань коробу, м; ω – кутова частота коливань, с^{-1} .

Отримане рівняння регресії (3) є математичною моделлю, яка демонструє вплив динамічних параметрів коробу — амплітуди (в діапазоні від 0,001 до 0,003 м) та кутової частоти (в діапазоні від 94,2 до 157 с^{-1}) його вимушених коливань, на транспортну продуктивність вібраційно-ударних машини з невтримним зв'язком між коробом і ситом, при 20 % рівні значущості.

Одержана математична модель (3) була піддана графічному аналізу, який дозволив встановити міру впливу кожного фактору на параметр оптимізації (рис. 4).

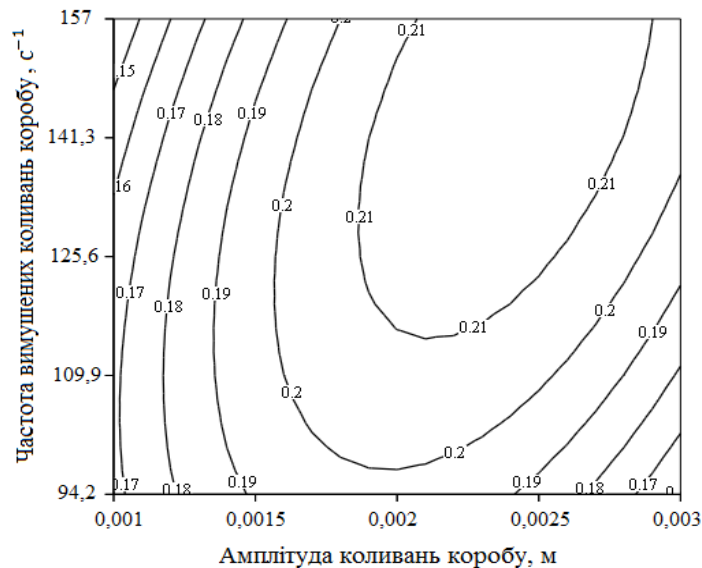


Рисунок 4. Залежність транспортної продуктивності від амплітуди та кутової частоти коливань коробу

Джерело: створено авторами

З отриманого графіка поверхні видно, що максимальна транспортна продуктивність вібраційно-ударної машини з невідтворюваним зв'язком між ситом і коробом, який здійснює направлені гармонійно стійкі коливання, забезпечується при режимі коливань з прискоренням $28 \dots 32 \text{ м/с}^2$ при амплітуді $0,002 \text{ м}$.

На рис. 5 наведено залежність коефіцієнта забивання від амплітуди та кутової частоти коливань коробу, надано фото сіючої поверхні в одному з експериментальних досліджень її забивання

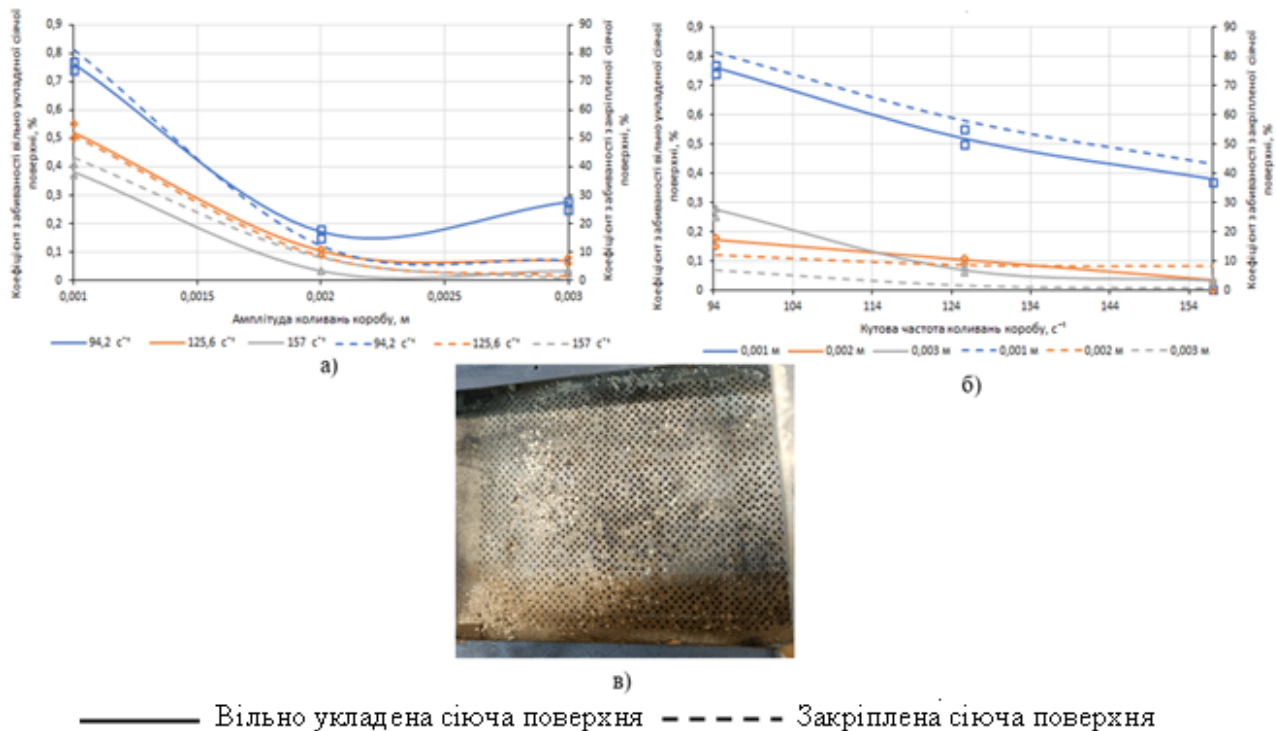


Рисунок 5. Залежність коефіцієнта забиваності від амплітуди (а) та кутової частоти (б) коливань коробу: в – характер забиваності вільно укладеної сіючої поверхні

Джерело: створено авторами

З отриманих графіків видно, що коефіцієнт забиваності вільно укладеної сіючої поверхні, на відміну від закріпленої, при однакових динамічних параметрах коробу менший в середньому в 10 разів, це свідчить про більш ефективне протікання процесу смоочиснення апертури сіючої поверхні на вібраційно-ударних машинах з невідстримним зв'язком між ситом і коробом.

Найбільший вплив на процес самоочищення має амплітуда коливань коробу, який характеризується складною нелінійною залежністю з асимптотичним наближенням, при збільшенні амплітуди до 0,002 м та прискоренні коливань коробу у 32 м/с^2 коефіцієнт забиваності зменшується, досягаючи свого мінімуму у 0,035 %, подальше збільшення амплітуди незначно на нього впливає, що свідчить про стабілізацію процесу та встановлення постійного рівня захаращеності сіючої поверхні.

Для вивчення взаємовпливу амплітуди вимушених коливань коробу вібраційно-ударної машини з невідстримним зв'язком та її кутової частоти на зміну коефіцієнта забиваності сіючої поверхні був проведений повний факторний експеримент, в якому реалізовано ортогональну план-матрицю другого порядку.

Математичний опис залежності коефіцієнта забиваності сіючої поверхні від обраних факторів здійснювався як і у випадку аналізу продуктивності грохочення отриманого і перевіреного на адекватність за критерієм Фішера квадратичного рівняння регресії

$$K_{\text{заб}} = 0,003 - 1610 \cdot A + 0,035 \cdot \omega + 1,115 \cdot A \cdot \omega + 340000 \cdot A^2 - 0,0002 \cdot \omega^2 \text{ \%}. \quad (4)$$

Отримане рівняння також є математичною моделлю, яка демонструє вплив динамічних параметрів коробу — амплітуди (в діапазоні від 0,001 до 0,003 м) та кутової частоти (в діапазоні від $94,2$ до 157 с^{-1}) його вимушених коливань, на коефіцієнт забиваності сіючої поверхні вібраційно-ударних машини з невідстримним зв'язком між коробом і ситом, при 20 % рівні значущості.

Одержана математична модель (4) була піддана графічному аналізу, який наведений на рис. 6, дозволив встановити міру впливу кожного фактору на параметр оптимізації

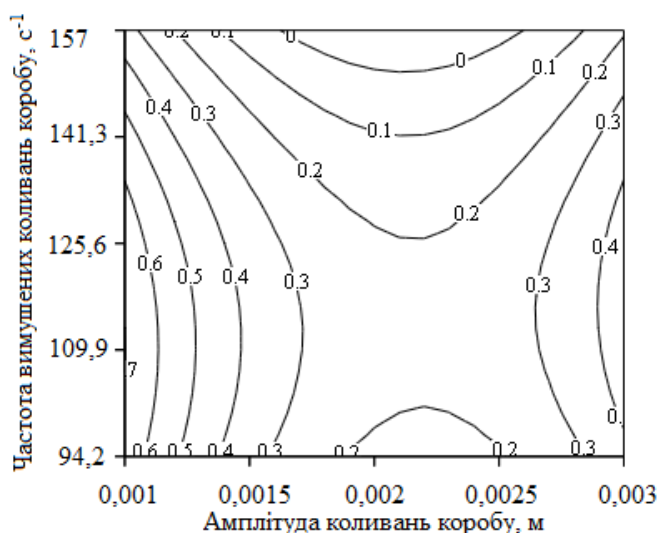


Рисунок 6. Залежність коефіцієнта забиваності сіючої поверхні від амплітуди та кутової частоти коливань коробу
Джерело: створено авторами

З отриманого графіку видно, що інтенсифікація процесу очищення сіючої поверхні вібраційно-ударної машини з невідстримним зв'язком між ситом і коробом відбувається за умови збільшення як амплітуди коливань коробу, так і її частоти. З точки зору енергоефективності та результативності процесу очищення, найбільш прийнятним значенням коефіцієнта

забиваності є 0,2 %, який забезпечується наступними динамічними параметрами коробу — амплітуда коливань 0,0018...0,0022 м при частоті 94,2...102 с⁻¹, що відповідає прискоренням від 16 до 23 м/с² та 0,0022 м при частоті 125,6 с⁻¹, що еквівалентне прискоренню 35 м/с².

Висновки (Conclusions)

В результаті проведених досліджень на розробленій лабораторній моделі грохоту з закріпленою та вільно укладеною сіючою поверхнею, що генерує вібраційно-ударну дію, було вивчено її вплив на продуктивність та процес забивання отворів сита при розсіві металургійної сировини.

За підсумками досліджень одержано математичну модель, яка пов'язує транспортну продуктивність та коефіцієнт забиваності сіючої поверхні вібраційно-ударної машини з невідомим зв'язком між ситом та її коробом при 20 % рівні значущості.

Встановлено, що максимальна транспортна продуктивність забезпечується при режимі коливань з прискореннями 28...32 м/с² при амплітуді $2 \cdot 10^{-3}$ м, а найбільш прийнятним значенням коефіцієнта забиваності при цій продуктивності є 0,2 %, який забезпечується амплітудою коливань в інтервалі $(1,8... 2,2) \cdot 10^{-3}$ м при частоті коливань 94,2...102 с⁻¹.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація, адміністрація проекту, П.Д.; методика, програмне забезпечення, аналіз отриманих даних, Ш.С.; перевірка, формальний аналіз, З.Г.; Serhii Henkulenko візуалізація, Г.С.; аналітичні дані, Ш.О.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Biletskyi, V.S., Oliinyk, T.A., Smyrnov, V.O. & Skliar, L.V. (2019). *Tekhnika ta tekhnolohiia zbahachennia korysnykh kopalyn: Chastyna I. Pidhotovchi protsesy*. Kryvyi Rih: Vydavets FOP Cherniavskiy D.O. Publishing. P. 200 <http://lib.ktu.edu.ua/wp-content/uploads/2016/07/Частина-1.pdf>
- KVMSH plus. (2025). Hrokhoty [Veb-sait]. <https://kvmsht-plus.all.biz/uk/grohoty-gg1078277>
- Metso. (2025). Screens and screening equipment [Veb-sait]. <https://www.metso.com/search/?purpose&sort&q=Screens%20and%20screening%20equipment%20&page=1>
- Sokur M.I., Biletskyi V.S., Vedmid I.A. & Robota Ye.M. (2020). *Rudopidhotovka (droblennia, podribnennia, klasyfikatsiia)*. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V. Publishing. P. 494 https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1IPcgY7_94aN7lnmfXdKiU44dqJYXJnDE
- Uchitel, A. (1992). *Sozdanie vysokoeffektivnykh vibracionnykh mashin dlya podgotovki metallurgicheskikh shiht* [Neopublikovannaya doktoroskaya dissertaciya]. Dnepropetrovskij Metallurgicheskij institut.
- Uchytel, A.D., Severniuk, V.V., Lialiuk, V.P. & Bolshakov, V.I. (1998). *Sortuvannia mineralnoi syrovyny i shykht na vibratsiinykh hrokhotakh*. Dnipropetrovsk. Porohy Publishing. P. 194

https://drive.google.com/file/d/1ADtCgr9xV8XsgAgpP3XJaPYWtQTHhbBm/view?usp=drive_link

Uchytel, S. A., Lialiuk, V. P. & Popolov, D. V. (2014). *Sortyrovka metallurhycheskykh shykht na vybratsyonnykh hrokhotakh*. Saarbrücken. Palmarium Academic Publishing. P. 413

https://drive.google.com/file/d/1BFuR3itkeVb7SWY-r0aJ2EdnG-kcni6H/view?usp=drive_link

Zavod promyslovoho obladnannia «Prohres». (2025) Hrokhoty ahlomeratu y obkotyshiv [Veb - sait].

<https://zavodgooprogress.com.ua/g9768701-grohoty-dlya-aglomerata>

Zaselskyi, V. Y., Popolov, D. V., Zaitsev, H. L., Bilodidenko, S. V., Kononov, D. O. & Pelykh I. V. (2019) *Udoskonalennia obladnannia ta protsesiv vuhlepidhotovky i koksosortuvannia metalurhiinoho vyrobnytstva*. Kryvyi Rih: Roman Kozlov Publishing. P. 203

Zelov, E. (1986). *Razrabotka i vnedrenie vysokoproizvoditelnykh shihtovykh grohotov s neodnorodnym polem traektorij* [Neopublikovannaya kandidatskaya dissertatsiya]. Krivorozhskij Gornorudnyj institut.



JEL: L 23, L 52, L 72, M 11, O 14

DOI: 10.62911/ete.2025.03.01.10

Peculiarities of application of lifting and loading equipment in changing conditions of mining production

Citation:

Tereshko, D., Temchenko, O., Siedniev, P., & Bahashova, N. (2025). Peculiarities of application of lifting and loading equipment in changing conditions of mining production. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol. 3 No. 1 (2025), 106-119. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.01.10>

Dmytro Tereshko

Education seeker, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: tereshko_dp_24085@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0009-0004-2392-9987

Oleksandr Temchenko

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: temchenko_oa50@ukr.net

 ORCID iD: 0000-0003-0020-2430

Pavlo Siedniev

Deputy Director for Production and Quality, Ukrtekhnoalliance LLC, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: pavelsednev76@gmail.com

 ORCID ID: 0009-0002-4555-726X

Natalia Bahashova

Assoc. Prof, PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: bahashova_nv@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-5242-1224

Received: 28/05/2025

Accepted: 04/06/2025



Abstract: The open-pit mining method, as the most widespread and productive, is currently of paramount importance in the development of the mining complex of Ukraine. One of the main directions of development of open-pit mining is continuous improvement of mining technology using the latest achievements in complex mechanization and automation of mining production. Over the past 30 years, the fleet of mining and loading equipment and mining transportation equipment has been almost completely renewed. The modern mining and loading, mining transportation and auxiliary equipment is characterized by a higher level of production and operation organization, as well as reliability and high performance in complex and changing operating conditions. Mining and loading operations in an open pit mine are essentially the removal of rock from the face and its loading into vehicles for further transportation to transshipment points. In deep iron ore quarries, powerful cyclic and continuous machines are used as extraction and loading equipment. Advanced domestic and imported equipment is used in the development of the Yeristovo iron quartzite deposit, which is being developed by the respective mining and processing plant. Draglines are mainly used for stripping operations, namely for removing overburden. Walking excavators manufactured by NKMZ are used to mine large volumes of rock, especially in large quarries. Both mechanical excavators (ECG) and hydraulic excavators of well-known models from such manufacturers as Caterpillar and Komatsu are used for mining and loading of minerals at Yeristovo deposit, and front loaders of these brands are also successfully used. Front-end loaders of popular brands Caterpillar and Komatsu are used to load overburden and minerals onto vehicles, and EKG-8i and EKG-10 are also used at reloading stations. To compare the achieved technical and technological indicators, the efficiency of excavation in deep iron ore pits was assessed in terms of reliability and energy intensity of mining production in the conditions of PrJSC Ingulets Iron Ore.

Keywords: deposits, mining production, equipment, productivity, quarry, machinery, dragline, mining, excavator, loader, reliability, energy intensity.

JEL:L 23, L 52, L 72, M 11, O 14

Peculiarities of application of lifting and loading equipment in changing conditions of mining production

Dmytro Tereshko

Education seeker, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: tereshko_dp_24085@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0004-2392-9987

Oleksandr Temchenko

Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: temchenko_oa50@ukr.net

 ORCID ID:0000-0003-0020-2430

Pavlo Siedniev

Deputy Director for Production and Quality, Ukrtekhnalliance LLC, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: pavelsednev76@gmail.com

 ORCID ID: 0009-0002-4555-726X

Natalia Bahashova

Assoc. Prof, PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: bahashova_nv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-5242-1224

Abstract: The open-pit mining method, as the most widespread and productive, is currently of paramount importance in the development of the mining complex of Ukraine. One of the main directions of development of open-pit mining is continuous improvement of mining technology using the latest achievements in complex mechanization and automation of mining production. Over the past 30 years, the fleet of mining and loading equipment and mining transportation equipment has been almost completely renewed. The modern mining and loading, mining transportation and auxiliary equipment is characterized by a higher level of production and operation organization, as well as reliability and high performance in complex and changing operating conditions. Mining and loading operations in an open pit mine are essentially the removal of rock from the face and its loading into vehicles for further transportation to transshipment points. In deep iron ore quarries, powerful cyclic and continuous machines are used as extraction and loading equipment. Advanced domestic and imported equipment is used in the development of the Yeristovo iron quartzite deposit, which is being developed by the respective mining and processing plant. Draglines are mainly used for stripping operations, namely for removing overburden. Walking excavators manufactured by NKMZ are used to mine large volumes of rock, especially in large quarries. Both mechanical excavators (ECG) and hydraulic excavators of well-known models from such manufacturers as Caterpillar and Komatsu are used for mining and loading of minerals at Yeristovo deposit, and front loaders of these brands are also successfully used. Front-end loaders of popular brands Caterpillar and Komatsu are used to load overburden and minerals onto vehicles, and EKG-8i and EKG-10 are also used at reloading stations. To compare the achieved technical and technological indicators, the efficiency of excavation in deep iron ore pits was assessed in terms of reliability and energy intensity of mining production in the conditions of PrJSC Ingulets Iron Ore.

Keywords: deposits, mining production, equipment, productivity, quarry, machinery, dragline, mining, excavator, loader, reliability, energy intensity.

Особливості застосування виймально-навантажувального устаткування в мінливих умовах гірничого виробництва

Дмитро Терешко

здобувач освіти, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: tereshko_dp_24085@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0004-2392-9987

Олександр Темченко

професор, д.т.н, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: temchenko_oa50@ukr.net

 ORCID ID: 0000-0003-0020-2430

Павло Седнів

заступник директора з виробництва та якості ТОВ "Укртехноальянс", Кривий Ріг, Україна

e-mail: pavelshednev76@gmail.com

 ORCID ID: 0009-0002-4555-726X

Наталя Багашова

доцент., к.г.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: bahashova_nv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-5242-1224

Анотація: Відкритому способу розробки корисних копалин, як найбільш поширеному і продуктивному, в теперішній час надається першорядне значення у розвитку гірничо-видобувного комплексу України. Одним з головних напрямків розвитку відкритої розробки родовищ корисних копалин є постійне вдосконалення технології гірничих робіт з застосуванням новітніх досягнень комплексної механізації та автоматизації гірничого виробництва. За останні 30 років майже повністю оновився парк виймально-навантажувального обладнання та гірничотранспортного устаткування. Сучасне виймально-навантажувальне, гірничотранспортне та допоміжне устаткування характеризується більш високим рівнем організації виробництва та експлуатації, а також надійністю та високою продуктивністю в складних та мінливих умовах роботи. Виймально-навантажувальні роботи в кар'єрі власне й полягають у виїмці гірничої маси з вибою та навантаження її в транспорт для подальшого транспортування до перевантажувальних пунктів. В глибоких залізрудних кар'єрах в якості виймально-навантажувального устаткування застосовуються потужні машини циклічної і безперервної дії. При розробці Єриствського родовища залізистих кварцитів, що розробляється відповідним гірничо-збагачувальним комбінатом, використовується передова як вітчизняна, так і імпортна техніка.

Для виробництва розкривних робіт, а саме для зняття пустої породи використовують здебільшого драглайни. Для розробки значних обсягів гірських порід, особливо на великих кар'єрах, застосовуються екскаватори крокуючі (ЕШ) виробництва NKMZ.

Для видобутку та навантаження корисних копалин на Єриствському родовищі використовуються як екскаватори механічного типу (ЕКГ), так і гідравлічні екскаватори відомих моделей від таких виробників, як Caterpillar, Komatsu, а також успішно використовуються і фронтальні навантажувачі цих марок. Для навантаження розкривних порід і корисних копалин на транспортні засоби використовуються фронтальні навантажувачі популярних брендів Caterpillar, Komatsu, а також на перевантажувальних пунктах використовують ЕКГ-8і, ЕКГ-10. Для порівняння досягнутих техніко-технологічних показників проведено оцінку ефективності екскавації на глибоких залізрудних кар'єрах з позиції надійності та енергоємності гірничого виробництва в умовах ПрАТ «Інгuleцького ГЗК».

Ключові слова: родовища, гірниче виробництво, устаткування, продуктивність, кар'єр, техніка, драглайн, видобуток, екскаватор, навантажувач, надійність, енергоємність.

Вступ (Introduction)

Українські гірничодобувні підприємства надають перевагу відкритому способу розробки корисних копалин, адже такий спосіб являється найбільш продуктивним. Щоб підвищити ефективність видобутку, знизити витрати та мінімізувати вплив на навколишнє середовище, підприємства гірничодобувного комплексу активно впроваджують сучасні технології видобутку корисних копалин. Впровадження використання імпортного обладнання є ключовим елементом ефективності виробничих процесів особливо в умовах глобальної економічної нестабільності. Використання імпортного обладнання (з Європи, США, Японії, Китаю) поєднується з вітчизняними розробками та модернізацією існуючої техніки.

ТОВ «Єристівський ГЗК» є одним з провідних гірничодобувних підприємств України яке утримує стабільний рівень виробництва в умовах складної економічної ситуації. Будівництво Єристівського кар'єру розпочалося у 2008 році у Полтавській області і тепер він є важливою частиною ГМК України. До війни сукупний внесок в ВВП країни складав 3,1%. Єристівський ГЗК залізорудної компанії Ferrexpo є наймолодшим українським ГЗК. З моменту свого заснування комбінат вирізнявся застосуванням кращих гірничих практик та сучасного технологічного обладнання. Попри війну він продовжує працювати та постачати продукцію споживачам мінеральної сировини і будувати плани на повоєнне майбутнє.

Для досягнення високих виробничих показників видобутку залізної руди в процесі відкритих гірничих робіт на цьому кар'єрі використовується високопродуктивне, ефективне та безпечне обладнання (Hryhoriev I. Ye., 2024). Цим дослідженням в контексті визначення можливостей підвищення ефективності використання виймально-навантажувального устаткування в умовах ТОВ "Єристівський ГЗК" було встановлено залежність фактичної продуктивності устаткування від часу циклу навантаження.

Питання щодо особливостей використання сучасного виймально-навантажувального устаткування та умови його застосування на прикладі ТОВ "Єристівський ГЗК" та ПрАТ «Інгулецький ГЗК» висвітлюються у дослідженнях українських вчених, серед яких (Hryhoriev I. Ye., 2024), (Anisimov O. O., 2023), (Sdvyzhkova, O., 2022), (Frolov O. O., 2021-2020), (Mishra, A., 2020), (Prokopenko, V. I., 2020), (Sobko B. Ie., 2020), (Symonenko, V. I., 2019) та інших. Вони розглянули дотичні теми, які перетинаються з визначенням ефективності використання сучасного виймально-навантажувального устаткування в умовах відкритих розробок корисних копалин.

Дослідженнями показників надійності виймально-навантажувального обладнання займалися відомі вчені (Hodynkevych T. A., 1985), (Shenderov A. I., 1976) ще в часи до незалежності України. Визначення впливу діаметра свердловин на ефективність вибухового відбою була досліджена (Usyk I. M., 1972), (Shapurin A. V., 1990) для умов кар'єра ПрАТ «ІнГЗК», де встановлено, що якість подрібнення порід вибухом суттєво впливає на подальшу роботу навантажувального устаткування. Передумови впровадження енергозберігаючих заходів в процесі видобутку і переробки залізорудної сировини також розглядали такі вчені як (Rakyshev B. R., 1998), (Temchenko A. H., 2000), (Maksymov S. V., 2012), (Diadechkin M. I., 2009), що дозволило визначити залежності продуктивності екскаваторів від діаметра куска гірничої маси на залізорудних кар'єрах.

Метою дослідження є вивчення особливостей використання сучасного виймально-навантажувального устаткування та умови його застосування на прикладі ТОВ "Єристівський ГЗК" та ПрАТ «Інгулецький ГЗК», яке дозволяє оцінити ключові аспекти використання потужного устаткування в мінливих умовах гірничодобувного виробництва, адаптацію до складних обставин, які склалися внаслідок негативної дії воєнного стану.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Виймально-навантажувальні роботи - один з основних технологічних процесів у залізорудних кар'єрах. Їх питома вага у загальних витратах на відкриту розробку родовищ сягає 25%. Ефективність виймально-навантажувальних робіт під час навантажування гірничої маси на залізничний і автомобільний транспорт значною мірою залежить від організації обмінних операцій на уступах, поєднання параметрів виймально-навантажувального і транспортного обладнання, взаємоузгодження виймально-навантажувальних робіт з іншими суміжними процесами.

Для проведення дослідження використано сукупність методів: загальні методи - синтез, узагальнення, абстрагування, системно-структурний, спеціальні методи - статистичний та порівняльного аналізу для оцінки рівня надійності та енергоефективності сучасного виймально-навантажувального устаткування на залізорудних кар'єрах.

Науковою базою для визначеної тематики дослідження виступили дослідження вітчизняних та міжнародних дослідників, матеріали наукових семінарів, симпозіумів, науково-практичних конференцій з питань розробки механізму оцінки ефективності екскавації на глибоких залізорудних кар'єрах з позиції надійності та енергоємності гірничого виробництва, документи законодавчо-нормативної бази України щодо специфіки організації та техніки безпеки на гірничому виробництві, статистичні матеріали суб'єктів господарської діяльності на ринку залізорудної сировини.

Результати (Results)

Як вже раніше було зазначено, Єристівський ГЗК у Полтавській області - перший успішний проєкт такого плану, що реалізований за часів незалежної України. Одним з ключових факторів, на який покладалися від початку, було залучення сучасної гірничої техніки провідних світових виробників. Перше гірниче обладнання це колісний грейдер марки CAT 16M та два гусеничні бульдозери CAT D10T виробництва Caterpillar. Перші розкривні роботи розпочали з залученням крокуючого екскаватора ЕШ-11/70.

Зі збільшенням обсягів виробництва поповнювався і парк гірничої техніки. В 2011 році відбувся запуск єдиного в Європі гідравлічного екскаватора Bucyrus RH200, а вже за рік запустили і другий гідравлічний екскаватор-гігант - Bucyrus RH340 та парк кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю 220 т марки Caterpillar 793D та Caterpillar 789 вантажопідйомністю 180 т.

Наразі комбінат використовує гірничотранспортне устаткування брендів Caterpillar, Komatsu та Hitachi. Зокрема унікальні 34- та 26-кубові екскаватори, 220-тонні автосамоскиди, яких не так багато на родовищах Європи.

Єристівське родовище складне за гідрогеологічними умовами (4 водоносні горизонти). М'які розкривні породи мають середню потужність 68–70 м з низькою пропускну здатністю. У зв'язку з цим як основне виймально-навантажувальне устаткування під час розроблення розкривних порід на кар'єрі доцільно використовувати крокуючі екскаватори – драглайни типу ЕШ-11/70. При цьому екскаватор ЕШ-11/70 також передбачається використовувати в подальшому для проходження осушувальних траншей та їх поглиблення.

Екскаватор ЕШ-11/70 виробництва НКМЗ (Новокраматорський машинобудівний завод) — це потужний гірничий екскаватор на гусеничному ході, здатний ефективно працювати на великих глибинах і відстанях. Його основні переваги — велика місткість ковша, довга стріла та прийнятна енергоефективність завдяки електричному приводу. Він використовується на великих вугільних, рудних та інших кар'єрах.

Основні технічні характеристики екскаватора ЕШ-11/70:

1. Загальні параметри:

- Тип: однокішловий електричний драглайн
- Модель: ЕШ-11/70 (ЕШ – "екскаватор крокуючий", 11 – об'єм ковша в м³, 70 – довжина стріли в метрах)

- Призначення: розкривні та добувні роботи в кар'єрах
- Спосіб пересування: крокуючий (з опорною плитою)
- Привід: електричний (перемінний струм)

2. Робочі параметри:

- Місткість ковша: 11 м³ (можливі модифікації з ковшами 10–15 м³).
- Довжина стріли: 70 м.
- Максимальний радіус копання: до 70–75 м.
- Максимальна глибина копання: до 45–50 м.
- Висота вивантаження: до 30–35 м.

3. Силове обладнання:

- Потужність електродвигунів: ~2000–2500 кВт (залежить від модифікації)
- Напруга живлення: 6–10 кВ (промислова мережа змінного струму)
- Тип двигуна: асинхронні або синхронні електродвигуни.

4. Масово-габаритні характеристики:

- Робоча маса: ~600–800 т (залежить від конфігурації)
- Тиск на ґрунт: ~0,15–0,25 МПа
- Швидкість пересування: 0,1–0,3 км/год

5. Продуктивність:

- Теоретична продуктивність: до 1500–2000 м³/год (залежить від умов роботи)
- Робочий цикл: 30–60 секунд

Особливості та застосування:

- Призначений для масштабних кар'єрних робіт, особливо при розробці родовищ корисних копалин (вугілля, руда, будматеріали).
- Використовує крокуючий хід для пересування, що дозволяє працювати на м'яких ґрунтах.
- Обладнаний потужною електричною системою, що забезпечує високу ефективність при великих навантаженнях.
- Може працювати у складі екскаваторно-транспортних комплексів (разом з автосамоскидами або залізничними думпкерами).

Як вже зазначалось, на відкритих розробках при проведенні розкривних робіт з подальшим вантаженням породи на гірничі автосамоскиди, в кар'єрі Єристівського родовища застосовують один з найбільших гідравлічних екскаваторів у світі, а саме Bucyrus RH200 та Bucyrus RH340.

Bucyrus RH200 та Bucyrus RH340 –екскаватори, який раніше вироблялися компанією Bucyrus International, яка була поглинена Caterpillar в 2011 році. Після придбання Bucyrus компанією Caterpillar деякі моделі були перейменовані та модернізовані, але RH200 залишається однією з найпотужніших машин у своєму класі.

Bucyrus RH200 або CAT6050 - екскаватор-гігант (рис. 1), призначений для наймасштабніших кар'єрних робіт. Він широко використовується на родовищах в Америці, Європі та Азії для розкривних робіт, видобутку вугілля, руди та інших корисних копалин.



Рисунок 1. Гідравлічний екскаватор Bucyrus RH200 (CAT 6050), Єристівський кар'єр.

Модель RH340 або CAT 6060 (рис. 2) - універсальна модель, компактніший, але такий же високопродуктивний для високонавантажених робіт.



Рисунок 2. Гідравлічний екскаватор Bucyrus RH340 (CAT 6060). Єристівський кар'єр.

Обидві моделі відомі своєю надійністю. Порівняння технічних показників гідравлічних кар'єрних екскаваторів (табл. 1.) наведено нижче.

Таблиця 1. Порівняння показників застосування гідравлічних кар'єрних екскаваторів Bucyrus RH200 та Bucyrus RH340

№ п/п	Характеристика	Bucyrus RH200 (CAT 6050)	Bucyrus RH340 (CAT 6060)
1	Вага	~537 тонн	~570 тонн
2	Об'єм ковша	25-28 м ³	25-34 м ³
3	Двигун	електропривід	електропривід
4	Потужність	~2 520 к.с. (1 880 кВт)	~3 000 к.с. (2 240 кВт)
5	Макс. радіус копання	~19,5 м	~18,9 м
6	Макс. глибина копання	~9,2 м	~8,9 м

7	Застосування	Великі відкриті кар'єри (вугілля, руда)	Середні та великі кар'єри (руда, породи)
---	--------------	--	---

Ключові відмінності:

- Потужність та розміри:
 - RH200 — більший і потужніший екскаватор, призначений для наймасштабніших кар'єрних робіт.
 - RH340 — компактніший, але досить високопродуктивний, часто використовується у середніх кар'єрах.
- Ковш:
 - RH200 може обладнуватися ковшами об'ємом понад 40 м³, тоді як RH340 — до 34 м³.
- Глибина копання:
 - RH200 має більший виліт стріли, що дозволяє йому ефективніше працювати на глибоких розробках.
- Енергопостачання:

Обидві моделі використовують електропривід через високу потужність.

Проведемо аналіз розрахункових даних продуктивності виймально-навантажувального обладнання в умовах Єристівського кар'єру і порівняємо їх з фактичними (табл. 2).

Таблиця 2. Показники часу циклу навантаження та продуктивності виймально-навантажувального обладнання в умовах ТОВ «Єристівський ГЗК»

Показник	Видобуток		Розкрив
	Висyrus RH200	CAT 6060	ЕШ-11/70
Обладнання			
Розрахункова продуктивність, м ³ /зм	9 956	16 128	10 787
Фактична продуктивність, м ³ /зм	9 269	9 900	8 562
Відхилення, %	7%	39%	21%
Теоретичний час циклу, хв	3	2	4,48
Фактичний час циклу, хв	2,4	2,31	6,15
Різниця в часі	-20 с	-31 с	+97 с

Порівнюючи дані продуктивності роботи виймально-навантажувального обладнання в умовах Єристівського кар'єру відзначимо, що фактична продуктивність значно менше ніж розрахункова. З теорії та практики відкритих гірничих робіт відомо, що продуктивність роботи екскаваторів-драглайнів можна істотно підвищити за рахунок зменшення кута повороту із вибою до точки розвантаження породи.

Оцінка ефективності екскавації на глибоких залізрудних кар'єрах з позиції надійності та енергоємності гірничого виробництва за складних і мінливих умов господарювання на ПрАТ «Інгuleцький ГЗК»

Інтенсифікація технологічних режимів у досить важких умовах роботи на кар'єрах не дозволяє навіть при ідеальних умовах експлуатації та обслуговування забезпечити безвідмовну роботу основних видів обладнання. Вихід з ладу окремих видів обладнання призводить до перевантажень обладнання, збитку через невиконання плану по залізрудній продукції, створює складнощі в управлінні технологічними процесами. Окрім того, особливу актуальність набуває вирішення завдання визначення факторів, які впливають на експлуатаційну надійність технологічних схем з установами відповідних закономірностей, виявленням «вузьких» місць з метою обґрунтованого планування терміну служби і резерву гірничого обладнання, планування технічного обслуговування, планово-попереджувальних ремонтів, капітальних ремонтів, обґрунтування потреби в запасних частинах, енергозбереження та нормування енергетичних ресурсів.

Визначення надійності технологічних процесів

З метою визначення показників надійності у відповідності з відомою методикою (Hohynkevych T. A., 1985), (Shenderov A.I., 1976) була оброблена вихідна інформація та розраховані показники надійності одного з ключових технологічних процесів: екскавації сирової руди при застосуванні циклічно-потокової технології (табл. 3).

Приведена в цій таблиці інформація свідчить про те, що найнижча надійність (ймовірність безвідмовної роботи) характерна саме для процесу екскавації, середня величина показника надійності якого за вказаний період складає лише 0,409. Аналіз експлуатаційних даних показує, що в загальній структурі потоку відмов екскаваторів частка відмов механічного устаткування становить приблизно 50 %, значну частину з них (30 %) займають відмови металоконструкцій. Останнє пов'язане з тим, що в металоконструкціях особливу небезпеку представляють зварні з'єднання, в яких найбільш інтенсивно виникають і розвиваються тріщини. Найбільш важливим фактором у даній проблемі є якість підривної підготовки гірських порід до екскавації. Кількісної мірою якості підривної підготовки гірських порід до екскавації є, як правило, середній діаметр куску у розвалі або вихід негабариту. Дані показники функціонально пов'язані між собою (рис. 3).

Таблиця 3. Вихідна інформація та показники надійності екскаваторів типу ЕКГ на ПрАТ «ІНГЗК»

Період	Чистий час роботи, годин	Простої екскаватора, пов'язані з відмовою електричної частини				Простої екскаватора, пов'язані з відмовами механічної частини				Ймовірність безвідмовної роботи	Ймовірність відмов, Р	Направленість на відмову, Т	Коефіцієнт готовності, Кг
		Кількість простотів, од.	Час простоїв, год.	Інтенсивність відмов	Інтенсивність відновлення	Кількість простоїв, од.	Час простоїв, год.	Інтенсивність відмов	Інтенсивність відновлення				
Лип 2018	724	15	29,58	0,022	0,507	6	14,7	0,008	0,408	0,786	0,214	539,7	0,968
Сер. 2018	629	11	216,58	0,027	0,051	45	144,42	0,093	0,312	0,385	0,615	21,1	0,753
Вер 2018	616	99	190,25	0,232	0,520	21	90,83	0,040	0,113	0,113	0,887	8,7	0,734
Жовт. 2018	639	62	198,67	0,115	0,628	27	147,33	0,055	0,257	0,257	0,743	20,0	0,827
Лист 2018	660	10	20,42	0,016	0,490	2	6	0,003	0,861	0,861	0,139	1229,6	0,978
Груд 2018	644	18	31,5	0,029	0,571	4	22,67	0,006	0,751	0,751	0,249	319,6	0,954
Січ 2019	650	33	66,58	0,057	0,496	29	254,33	0,073	0,354	0,354	0,646	25,8	0,824
Лют 2019	604	60	1268,25	0,126	0,468	20	95,33	0,039	0,266	0,266	0,734	18,4	0,804
Бер 2019	645	67	157,75	0,137	0,425	22	134,25	0,043	0,236	0,236	0,764	14,6	0,765
Квіт 2019	642	33	73,75	0,058	0,447	23	165,17	0,048	0,427	0,427	0,573	35,4	0,847
Трав. 2019	649	33	76,08	0,058	0,434	26	183,42	0,056	0,404	0,404	0,596	31,2	0,835
Черв 2019	635	58	97,42	0,108	0,595	23	129,92	0,046	0,203	0,293	0,707	22,9	0,834
Лип 2019	629	81	144,83	0,167	0,559	26	11,58	0,042	0,187	0,187	0,813	36,7	0,931
Середнє значення										0,409			

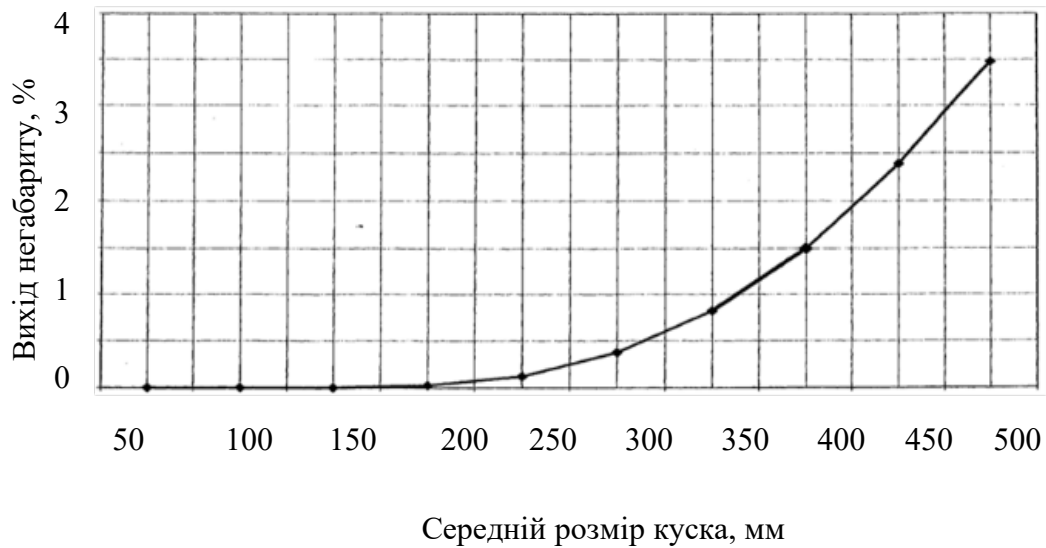


Рисунок 3. Залежність виходу негабарита від середнього діаметра куска

Виконані виміри гранулометричного складу підірваної гірничої маси у кар'єрі ПрАТ «ІнГЗК» показує, що середній діаметр куска складає 400 - 450 мм. Основним фактором впливу на тріщиноутворення у металоконструкціях екскаваторів є наявність випадкових перевантажень, що виникають внаслідок зіткнення ковша з некондиційними шматками (55 %), шарами зруйнованих порід з низьким коефіцієнтом розпушення (25 %). Збільшення середнього діаметра куска у розвалі ($d_{\text{ср}}$) з 0,3 до 0,5 м збільшує ріст тріщин у 3 - 3,5 рази, а при зміні коефіцієнта розпушення за шарами розвалу з 1,1 до 1,5 збільшує в 4,2 рази. Зменшення середнього діаметра куска підірваної гірничої маси в 1,5 рази збільшує в 2,5 рази необхідний обсяг породи, що екскавується, для перетворення стандартного тріщиноподібного дефекту в тріщину. Зі збільшенням енергоємності процесу в 2,5 рази середня кількість циклів навантаження на металоконструкції екскаватору зростає приблизно в 1,7 рази. Це вказує на зміну умов роботи - від вибою з середньою глибиною 0,3 м до менш якісно підготовленого вибою з глибиною близько 0,5 м. Дослідженнями [Usyk I.M., 1972], [Shapurin A.V, 1990] проведеними для умов кар'єра ПрАТ «ІнГЗК» встановлено вплив якості подрібнення порід вибухом на напруження в основних вузлах екскаватора при роботі у важкому вибою ($d_{\text{ср}}=400$ мм) в 3,55 - 4,57 рази вище, ніж при роботі в легкому вибою ($d_{\text{ср}}=180$ мм). Отримані залежності доцільно враховувати при плануванні термінів і обсягів робіт у конкретних умовах гірничого виробництва на окремому залізрудному родовищі, у тому числі на кар'єрі ТОВ «Єривський ГЗК».

Визначення енергоємності технологічних процесів.

Для визначення енергоємності з використанням відомих методик енергетичної оцінки відкритої гірничої технології проведені розрахунки експлуатаційної продуктивності екскаватора ЕКГ -8І в залежності від діаметра середнього куска, результати яких представлені на рисунку 2, з якого видно, що при зміні середнього куска від 200 до 450 мм продуктивність знижується з 346,3 до 183,5 м³/год, тобто в 1,9 рази. Суттєво впливаючи на експлуатаційну продуктивність екскаватора, якість подрібнення ($d_{\text{ср}}$) відбивається і на енергоємності процесу навантаження. Поряд з кусковатістю підірваної гірничої маси другим показником її стану, який впливає на продуктивність і енергоємність екскавації, є коефіцієнт розпушення, який відображає ряд фізичних параметрів середовища: якість дроблення ($d_{\text{ср}}$), ступінь переміщення масиву, зв'язаність порід, зрушеність, стійкість. Дослідженнями відомого вченого (Tanhaiev I.A., 1986) встановлена залежність коефіцієнта розпушення від середнього діаметра підірваної гірничої маси:

$$K_p = 1 + d_{\text{ср}} \cdot (1)$$

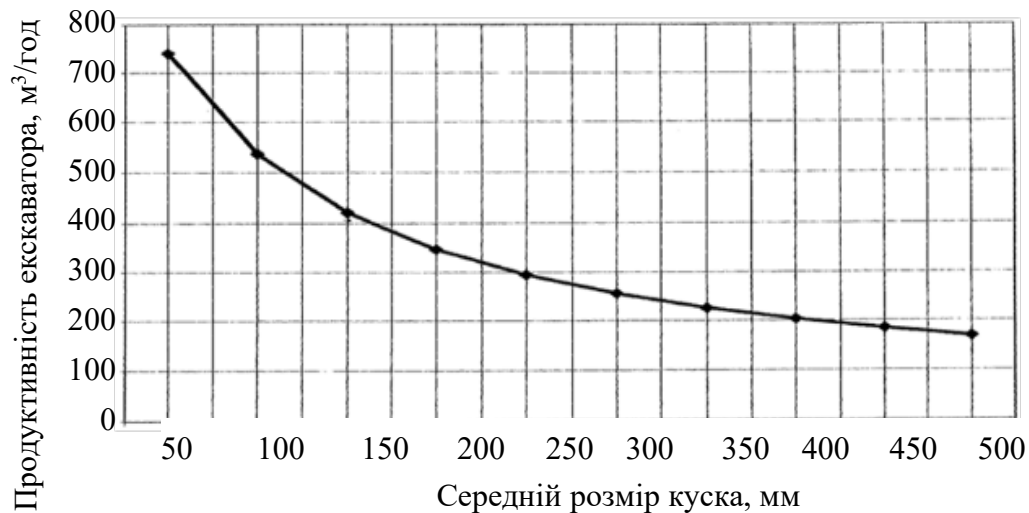


Рисунок. 4. Залежність продуктивності екскаватора ЕКГ -8І від середнього діаметра куску гірничої маси

Просторова змінність коефіцієнта розпушення в поєднанні з нестабільною якістю подрібнення порід у різних точках розвалу за даними досліджень (*Rakyshev B.R., 1998*), (*Temchenko A.H., 2000*), (*Maksymov S.V., 2012*) суттєво впливає на енергоємність екскавації і продуктивність екскаватора залежно від поєднання абсолютних значень $d_{\text{сер}}$, K_p та інших факторів, питомі енергетичні витрати на екскавацію 1 м³ гірничої маси можуть відрізнятися в 10 разів. Аналіз звітних даних кар'єру ПрАТ «ІнГЗК» у 2019 році показує, що при розмірі середнього куску підірваної гірничої маси 450 мм питомі витрати електроенергії на екскавацію склали 1,58 кВт.год/м³, при розмірі середнього куску 200 мм енергоємність екскавації не перевищувала 0,6 кВт.год/м³, а витрати електроенергії знизились в 2,63 рази. Для оцінки якості вибуху нами пропонується використовувати енергетичну шкалу екскавації, переваги якої, насамперед, полягають в її універсальності. Зокрема, значення питомої енергоємності навантаження практично не залежать від марки екскаватора типу механічна лопата. Енергетичну шкалу можливо використовувати для оцінки якості вибуху. На відміну від традиційного способу визначення якості вибуху по гранулометричному складу гірничої маси, така оцінка є більш об'єктивною, оскільки включає весь комплекс фізико-технічних параметрів вибою (табл. 4). Виходячи з наведеного, стає правомірне твердження про те, що за дуже поганої якості подрібнення наявна висока енергоємність екскавації і подрібнення.

Таблиця 4. Енергетична шкала екскавації

Якість дроблення	Енергоємність екскавації кВт*год/м³	Ймовірні значення $d_{\text{сер}}$, мм
Добра	<0,4	<200
Задовільна	0,4-0,7	<300
Погана	0,7-0,9	<400
Дуже погана	>0,9	>400

Цей висновок у повній мірі узгоджується з висновками, наведеними в роботі (*Diadechkin M.I., 2009*), а також аналізом звітних даних дробильної фабрики ПрАТ «ІнГЗК» за 2019 рік, який показує, що при розмірі середнього куску підірваної гірничої маси 400 - 450 мм питомі витрати електроенергії складають 3,13 кВтгод/т, при розмірі середнього куску 200 мм енергоємність подрібнення не перевищувала 2,0 кВт год /т, тобто витрати електроенергії

зросли в 1,57 рази. Це вказує на об'єктивну необхідність зниження енергоємності виробництва товарної продукції шляхом оптимізації розміру середнього куска при вибуховій підготовці руди з перерозподілом енергетичних витрат між вибуховим дробленням (в сторону вибухових робіт) і механічним подрібненням на збагачувальній фабриці, що дозволить підвищити продуктивність як виймально-навантажувального, так і подрібнювального устаткування на 6-10 %. Таким чином, запропонована методика оцінки надійності і енергоємності технологічних процесів може бути використана при формуванні ефективності подальшого застосування відкритої гірничої технології на глибоких кар'єрах з позиції забезпечення конкурентоспроможності товарної залізовмісткої продукції.

Висновки (Conclusions)

Отже, в теперішній час особливу актуальність набуває вирішення завдання визначення факторів, які впливають на експлуатаційну надійність технологічних схем екскавації гірничої маси з установами відповідних закономірностей, виявленням «вузьких» місць з метою обґрунтованого планування терміну служби і резерву гірничого обладнання, зокрема ефективного застосування мехлопат, драглайнів та гідравлічних іноземних екскаваторів в складних та мінливих умовах виробництва, планування технічного обслуговування, планово-попереджувальних ремонтів, капітальних ремонтів виймально-навантажувального устаткування, обґрунтування потреби в запасних частинах, енергозбереження та нормування енергетичних ресурсів при подальшій розробці глибоких залізрудних кар'єрів.

Таким чином, запропонована методика оцінки надійності і енергоємності технологічних процесів може бути використана при подальшому застосуванні виймально-навантажувального устаткування для подальшої розробки вітчизняних родовищ корисних копалин в контексті підвищення ефективності відкритої гірничої технології з позиції забезпечення конкурентоспроможності вітчизняної залізовмісткої продукції на зовнішніх ринках.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Автори даної науково-дослідницької статті внесли відповідний вклад у дослідження та проведення аналізу обраної проблематики, щодо напрацювання засад для оцінки ефективності застосування сучасного виймально-навантажувального устаткування на глибоких залізрудних кар'єрах з позиції надійності та енергоємності гірничого виробництва за складних і мінливих умов господарювання на сучасних гірничо-збагачувальних комбінатах України. Концептуалізація, аналіз даних, запропоновані рекомендації по роботі, Т.О; огляд літератури, аналітичні дані, побудова рисунків, таблиць, візуалізація Т.Д., огляд літератури, загальний аналіз, висвітлення проблеми, С.П.; огляд літератури та методика, висвітлення проблеми, перевірка даних, запропоновані рекомендації Б.Н. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Anisimov, O. O., Hrytsenko, L. S., Davidenko, N. D., Cherniaieva, O. V., & Sydorenko, I. K. (2023). Factory, shcho vplyvaiut na produktyvnist ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksiv [Factors affecting the productivity of excavator-truck systems]. *Tekhnichna Inzheneriia*, 1(91), 262–270. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-262-270](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-262-270)
- Carvalho, F. P. (2017). Mining industry and sustainable development: Time for change. *Food and Energy Security*, 6(2), 61–77. <https://doi.org/10.1002/fes3.109>
- Diadechkin, M. I., & Shypovskiy, H. V. (2009). Vybukhove ruinuвання sylno obvodnennykh porodnykh masyviv na Inhuletskomu HZK [Blasting destruction of highly watered rock masses at Inhuletskyi Mining and Processing Plant]. *HirnychiZhurnal*, 2, 37–39.
- Frolov, O. O., & Beltek, M. (2021). Influence of the hydraulic excavator location with a backhoe in the face on the efficiency of rock mass excavation. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, 3(128), 70–75. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.3.70-75>
- Frolov, O. O., & Kosenko, T. V. (2020). Udoskonalennia metodu vyznachennia ratsionalnykh parametriv ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksiv potuzhnykh karieriv [Improving the method for determining rational parameters of excavator-truck systems in powerful quarries]. *Tekhnichna Inzheneriia*, 1(85), 242–248. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-1\(85\)-242-248](https://doi.org/10.26642/ten-2020-1(85)-242-248)
- Frolov, O.O., Sokolovska, M.I., Kramorenko, L.V., & Kononovych, V.A. (2017). Optymizatsiia tekhnolohichnykh parametriv ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksiv [Optimization of technological parameters of excavator-truck systems]. *Visnyk NTUU «KPI». Serii: Hirnytstvo*, 34, 28–33. <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2017.34.110487>
- Holynkevych, T. A. (1985). *Prykladna teoriia nadiinosti* [Applied reliability theory] (2nd ed.). Vyscha Shkola.
- Hryhoriev, I. Ye., Hryhoriev, Yu. I., Shvets, Ye. M., Lutsenko, S. O., & Lukin, A. Yu. (2024). Doslidzhennia efektyvnosti vykorystannia vyimalno-navantazhuvalnoho obladnannia v umovakh TOV «Yerystivskiy HZK» [Research on the efficiency of excavating and loading equipment at Yerystivskiy Mining and Processing Plant]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Serii: Tekhnichni Nauky*, 1, 90–95. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-13>
- Maksymov, S. V., Temchenko, O. A., & Temchenko, H. V. (2012). Peredumov vsuperech enerhooshchadnym vytratam u protsesi vydobutku ta pererobky kvartsovoi rudy [Prerequisites for energy-saving costs in the extraction and processing of quartz ore]. *Visnyk KTU*, 32, 250–255.
- Maleki, M., Jélvez, E., Emery, X., & Morales, N. (2020). Stochastic open-pit mine production scheduling: A case study of an iron deposit. *Minerals*, 10(7), 585. <https://doi.org/10.3390/min10070585>
- Mishra, A., Palei, S. K., & Gupta, S. (2020). Reliability analysis of dragline using equivalent aging model. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(8), 6975–6984. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04622-3>
- Palei, S. K., Das, S., & Chatterjee, S. (2020). Reliability-centered maintenance of Rapier dragline for optimizing replacement interval of dragline components. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(4), 1121–1136. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00226-5>
- Prokopenko, V. I., Pilov, P. I., Cherep, A. Y., & Pilova, D. P. (2020). Managing mining enterprise productivity by open pit reconstruction. *Eurasian Mining*, 1, 42–46. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.08>
- Purhamadani, E., Bagherpour, R., & Tudeshki, H. (2021). Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125228, 497–504. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125228>
- Rakyshev, B. R. (1998). *Enerhoiemnist mekhanichnoh oruinuvannia hirskykh porid* [Energy intensity of mechanical rock destruction]. Baspaher.
- Sdvyzhkova, O., Moldabayev, S., Bascetin, A., Babets, D., Kuldeyev, E., Sultanbekova, Z., ..., & Issakov, B. (2022). Probabilistic assessment of slope stability at ore mining with steep layers in deep open pits. *Mining of Mineral Deposits*, 16(4). <https://doi.org/10.33271/mining16.04.011>

- Shamsi, M., Pourrahimian, Y., & Rahmanpour, M. (2022). Optimisation of open-pit mine production scheduling considering optimum transportation system between truck haulage and semi-mobile in-pit crushing and conveying. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 36(2), 142–158. <https://doi.org/10.1080/17480930.2021.1996983>
- Shapurin, A. V. (1990). *Rozrakhunka parametriv buropidryvnykh robot* [Calculation of drilling and blasting parameters]. UMK VO.
- Shenderov, A.I., Yemelianov, O.A., & Odin, I.M. (1976). *Nadiinist i produktyvnist hirnychotransportnoho obladnannia* [Reliability and productivity of mining transport equipment]. Nedra.
- Sinha, S. K., & Choudhary, B. S. (2020). Pit optimization for improved NPV and life of mine in heterogeneous iron ore deposit. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 101(2), 253–264. <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00236-z>
- Sobko, B. Ie., Panchenko, V. V., Lotous, V. V., & Vinivitin, D. V. (2020). *Orhanizatsiia i planuvannia vidkrytykh hirnychokh robot (systemnyi pidkhid)* [Organization and planning of open-pit mining (system approach)]. NTU "DP".
- Symonenko, V. I., Haddad, J. S., Cherniaiev, O. V., Rastsvietaiev, V. O., & Al-Rawashdeh, M. O. (2019). Substantiating systems of open-pit mining equipment in the context of specific cost. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 100, 301–305. <https://doi.org/10.1007/s40033-019-00185-2>
- Taghizadeh, A., & Demirel, N. (2017). Application of machine learning for dragline failure prediction. *E3S Web of Conferences*, 15, 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171503002>
- Tanhaiev, I.A. (1986). *Enerhoiemnist protsesiv vydobutku i pererobky korysnykh kopalyn* [Energy intensity of mining and mineral processing processes]. Nedra.
- Temchenko, A.H., & Temchenko, O.A. (2000). Enerhoiemnist droblennia hirslykh hporid za tsyklichno-potokovoi tekhnolohii [Energy intensity of rock crushing in cyclic-flow technology]. *Naukovi Aspekty Pidvyshchennia Efektyvnosti Hirnychoho Vyrobnystva*, 100–103.
- Usyk, I. M., Oberemok, O. M., Heneralov, H. S., et al. (1972). Vplyv diametra sverdlovyn na efektyvnist vybukhovoho rozkryvu sylnoobvodnennykh zalizystykh kvartsytiv [The influence of borehole diameter on the efficiency of blasting in highly watered ferruginous quartzites]. *Hirnychi Zhurnal*, 5, 39–42.



JEL: C01, C15, C2

DOI: 10.62911/ete.2025.03.01.11

Method for representing the electromechanical characteristics of an electric traction drive with sequentially excited DC motors

Citation:

Pyrozhenko A., Modlo. Y., Lytovchenko. Y. & Lytovchenko. O. (2025). Method for representing the electromechanical characteristics of an electric traction drive with sequentially excited DC motors. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol.3 No.1 (2025), 120-133. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.01.11>

Andrii Pyrozhenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: a.v.pirozhenko@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0001-8148-4956

Yevhenii Modlo

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: modlo_yo@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-2037-1557

Viacheslav Khyzhniak

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: krogzhuns@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0001-6449-2778

Yuliia Lytovchenko

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: lytovchenko@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0009-0004-0996-3441

Oleksandr Lytovchenko

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: lytovchenko_ov@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-2142-2697

Abstract: The shortcomings that occur during the construction of the electromechanical characteristics of a traction electric drive with DC motors of series excitation are presented. An analysis of known methods of constructing the specified electromechanical characteristics is carried out, such as by universal characteristic, by known catalog data of the engine. Based on the analysis, a number of shortcomings of known methods of constructing the electromechanical characteristics of a traction electric drive with DC motors of series excitation and their inconsistency with existing requirements are revealed. The dependence of the magnetic flux of DC motors with series excitation on the load on the shaft is the cause of the nonlinearity of their electromechanical characteristics. Factories - manufacturers of such engines provide experimentally obtained universal characteristics (expressed in relative units). Using them, it is possible to construct a universal mechanical characteristic, from which it is possible to proceed to the characteristics of the selected engine. To do this, it is necessary to multiply the values I , M and ω laid out along the axes by their nominal values. In this case, it is usually necessary to change the scale grid of the graph, since the previous one will correspond to the fractional value of the quantities plotted on the axes. The presented method of constructing electromechanical characteristics according to the universal characteristic has an error of up to 30%, which is associated both with the nonlinearity of the electromechanical characteristics of DC motors with series excitation, and with the need for a graphic transition from the universal characteristic to the characteristic of a specific traction motor. The method of constructing electromechanical characteristics according to catalog data has similar disadvantages. A method of constructing electromechanical characteristics analytically is proposed, which allows avoiding the disadvantages.

Keywords: Traction motor, electromechanical characteristics, polynomial of degree n , Lagrange interpolation formula.

Received: 10/06/2025

Accepted: 16/06/2025



JEL: C01, C15, C2

Method for representing the electromechanical characteristics of an electric traction drive with sequentially excited DC motors

Andrii Pyrozhenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: a.v.pirozhenko@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0001-8148-4956

Yevhenii Modlo

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: modlo_yo@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-2037-1557

Viacheslav Khyzhniak

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: krogzhuns@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0001-6449-2778

Yuliia Lytovchenko

Assistant,, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: lytovchenko@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0009-0004-0996-3441

Oleksandr Lytovchenko

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: lytovchenko_ov@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-2142-2697

Abstract: The shortcomings that occur during the construction of the electromechanical characteristics of a traction electric drive with DC motors of series excitation are presented. An analysis of known methods of constructing the specified electromechanical characteristics is carried out, such as by universal characteristic, by known catalog data of the engine. Based on the analysis, a number of shortcomings of known methods of constructing the electromechanical characteristics of a traction electric drive with DC motors of series excitation and their inconsistency with existing requirements are revealed. The dependence of the magnetic flux of DC motors with series excitation on the load on the shaft is the cause of the nonlinearity of their electromechanical characteristics. Factories - manufacturers of such engines provide experimentally obtained universal characteristics (expressed in relative units). Using them, it is possible to construct a universal mechanical characteristic, from which it is possible to proceed to the characteristics of the selected engine. To do this, it is necessary to multiply the values I , M and ω laid out along the axes by their nominal values. In this case, it is usually necessary to change the scale grid of the graph, since the previous one will correspond to the fractional value of the quantities plotted on the axes. The presented method of constructing electromechanical characteristics according to the universal characteristic has an error of up to 30%, which is associated both with the nonlinearity of the electromechanical characteristics of DC motors with series excitation, and with the need for a graphic transition from the universal characteristic to the characteristic of a specific traction motor. The method of constructing electromechanical characteristics according to catalog data has similar disadvantages. A method of constructing electromechanical characteristics analytically is proposed, which allows avoiding the disadvantages.

Keywords: Traction motor, electromechanical characteristics, polynomial of degree n , Lagrange interpolation formula.

Метод побудови електромеханічних характеристик тягового електропривода з двигунами постійного струму послідовного збудження

Андрій Пироженко

доцент, к.т.н., Державний Університет економіки і технологій, Україна

e-mail: a.v.pirozhenko@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0001-8148-4956

Євгеній Модло

доцент, к.п.н., Державний Університет економіки і технологій, Україна

e-mail: modlo_yo@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0003-2037-1557

Вячеслав Хижняк

доцент, к.т.н., Державний Університет економіки і технологій, Україна

e-mail: krogzhuns@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0001-6449-2778

Юлія Литовченко

асистент, Державний Університет економіки і технологій, Україна

e-mail: lytovchenko@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0009-0004-0996-3441

Олександр Литовченко

асистент, Державний Університет економіки і технологій, Україна

e-mail: lytovchenko_ov@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-2142-2697

Анотація: Наведені недоліки, що мають місце під час побудови електромеханічних характеристик тягового електропривода з двигунами постійного струму послідовного збудження. Проведений аналіз відомих методів побудови вказаних електромеханічних характеристик, як то за універсальною характеристикою, за відомими каталожними даними двигуна. На підставі проведеного аналізу виявлений ряд недоліків відомих методів побудови електромеханічних характеристик тягового електропривода з двигунами постійного струму послідовного збудження та їх невідповідності існуючим вимогам. Залежність магнітного потоку двигунів постійного струму з послідовним збудженням від навантаження на валу є причиною нелінійності їх електромеханічних характеристик. Заводи - виробники таких двигунів дають зняті експериментальним шляхом універсальні характеристики (виражені у відносних одиницях). Користуючись ними, можна побудувати універсальну механічну характеристику, від якої можна перейти до характеристики обраного двигуна. Для цього необхідно відкладені по осях величину I , M і ω помножити на їх номінальні значення. При цьому зазвичай виникає необхідність змінити масштабну сітку графіка, оскільки колишня буде відповідати дробовому значенню величин, що відкладаються по осях. Наведена методика побудови електромеханічних характеристик за універсальною характеристикою має похибку до 30 %, що пов'язано як з нелінійністю електромеханічних характеристик двигунів постійного струму з послідовним збудженням, так і необхідності графічного переходу від універсальної характеристики до характеристики конкретного тягового двигуна. Аналогічні недоліки має методика побудови електромеханічних характеристик за

каталожними даними. Запропонована методика побудови електромеханічних характеристик аналітичним шляхом, що дозволяє уникнути вказаних вище недоліків.

Ключові слова: тяговий двигун, електромеханічні характеристики, поліном ступеню n , інтерполяційна формула Лагранжа.

Вступ (Introduction)

Під час розробки схем автоматизованого електроприводу виникає необхідність побудови електромеханічних характеристик їх електродвигунів. Особливі складнощі виникають під час побудови електромеханічних характеристик тягового електропривода з двигунами постійного струму послідовного збудження. Не зважаючи на те, що в індустрії залізничного транспорту декілька компаній в останні роки досліджували можливість використання синхронних моторів із постійними магнітами (*Sarbajit Paul, Pil-Wan Han, 2022*) це все ж таки більше стосується високошвидкісного перевезення, тож використання двигунів постійного струму послідовного збудження в технологічних перевезеннях все ще є актуальним.

Вищезазначені складнощі зумовлені зумовлено тим, що електромеханічні характеристики двигунів нелінійні через залежність магнітного потоку двигунів постійного струму з послідовним збудженням від навантаження на валу. Відомий метод побудови вказаних електромеханічних характеристик за універсальною характеристикою, яка надається заводом – виробником двигунів (*Milykh V., O. Shavolkin O., 2018*), (*Milykh V.I., 2013*). Графічний перехід від універсальної характеристики до електромеханічних характеристик конкретного двигуна зі зміною масштабної сітки графіків призводить до значних похибок у розрахунках. Крім того, в цьому методі не враховується залежність індуктивності кола якоря від величини струму якоря і зовнішня характеристика реального мостового трифазного перетворювача, що живить тяговий електропривод з двигунами постійного струму послідовного збудження (напруга живлячої мережі вважається постійною). Таким чином, розрахунку результуюча похибка розрахунку досягає 30%.

Також відома методика побудови електромеханічних характеристик за каталожними даними двигуна (*Kytaiev O.V., Hlukhova V.I., 2011*), яка має аналогічні недоліки.

Таким чином, недостатня ефективність відомих методів побудови електромеханічних характеристик тягового електропривода з двигунами постійного струму послідовного збудження підтверджує необхідність знаходження більш оптимальних рішень.

Результати (Results)

Для виведення характеристик електромеханічних характеристик аналітичним шляхом приймемо наступні допущення:

- до колу якоря тягового двигуна прикладена напруга, що пульсує, під час аналізу використовується середнє значення цієї напруги U ;
- для аналітичного опису характеристики намагнічування тягового двигуна використовується наближений аналітичний вираз у вигляді багаточлену n -го ступеню;
- струм у колі якоря є пульсуючим, під час виводу розрахункових співвідношень використовується середнє значення цього струму $I_a (I_3)$;
- у якості основного номінального режиму тягового двигуна приймається довготривалий режим роботи;
- під час виводу розрахункових співвідношень застосовується система відносних одиниць, при цьому в якості базових приймаються параметри довготривалого номінального режиму.

У подальшому викладені прийняті наступні позначення:

- $m = \frac{M}{M_{en}}$
- відносне значення електромагнітного моменту M тягового двигуна;

- $$j = \frac{\Phi}{\Phi_n}$$
- $\frac{\Phi}{\Phi_n}$ - відносне значення магнітного потоку тягового двигуна;
$$J = \frac{U}{U_n}$$
 - $\frac{U}{U_n}$ - відносне значення напруги кола якоря тягового двигуна;
$$i = \frac{I_{я}}{I_{я.н}}$$
 - $\frac{I_{я}}{I_{я.н}}$ - відносне значення струму якоря тягового двигуна;
$$n = \frac{W}{W_n}$$
 - $\frac{W}{W_n}$ - відносне значення частоти обертання якоря тягового двигуна, яке дорівнює відносному значенню швидкості руху поїзду;
$$R_n = \frac{U_n}{I_{я.н}}$$
 - $\frac{U_n}{I_{я.н}}$ - номінальний опір кола якоря;
$$r_{я} = \frac{R_{я}}{R_n}$$
 - $\frac{R_{я}}{R_n}$ - відносне значення опору якоря;
$$r = \frac{R_{я} + R_{доп}}{R_n}$$
 - $\frac{R_{я} + R_{доп}}{R_n}$ - відносне значення опору якоря з урахуванням зовнішнього додаткового опору;
$$r_{я} = \frac{R_{з}}{R_n}$$
 - $\frac{R_{з}}{R_n}$ - відносне значення опору обмотки збудження.

Під час розрахунку тягового електроприводу застосовують статичні швидкісну та механічну характеристики двигунів. Вказані характеристики у відносних одиницях мають наступний вигляд:

$$n = \frac{J - r_{я} i}{(1 - r_{я}) j}; \quad (1)$$

$$n = \frac{J}{(1 - r_{я}) j} - \frac{r m}{(1 - r_{я}) j^2}. \quad (2)$$

Механічна характеристика (2) отримана з швидкісної (1) шляхом підстановки

$$i = \mu / \varphi. \quad (3)$$

Знаючи характеристику намагнічування двигуна $\varphi = f(i)$, можна представити залежність потоку φ від струму i , а з урахуванням (3) і залежність потоку φ від моменту μ у вигляді поліномів ступеню n , дійсних для позитивних значень i та μ :

$$j = a_0 + a_1 i + a_2 i^2 + \dots + a_n i^n; \quad (4)$$

$$j = b_0 + b_1 m + b_2 m^2 + \dots + b_n m^n. \quad (5)$$

Якщо представити залежності $1/\varphi$ та i/φ від i та μ відповідними поліномами ступеню n , отримаємо:

$$\frac{1}{j} = c_0 + c_1 i + c_2 i^2 + \dots + c_n i^n; \quad (6)$$

$$\frac{i}{j} = d_0 + d_1 i + d_2 i^2 + \dots + d_n i^n; \quad (7)$$

$$\frac{1}{j} = e_0 + e_1 m + e_2 m^2 + \dots + e_n m^n; \quad (8)$$

$$\frac{i}{j} = f_0 + f_1 m + f_2 m^2 + \dots + f_n m^n, \quad (9)$$

тоді швидкісну та механічну характеристики можна представити також поліномами ступеню n :

$$n = A_0 + A_1 i + A_2 i^2 + \dots + A_n i^n; \quad (10)$$

$$n = B_0 + B_1 m + B_2 m^2 + \dots + B_n m^n, \quad (11)$$

в яких коефіцієнти $A_0, A_1, \dots, A_n$ та $B_0, B_1, \dots, B_n$ є функціями відповідних коефіцієнтів залежностей (6) - (9) та відносних параметрів двигуна ϑ, r_ϑ , та ρ :

$$A_0 = \frac{c_0 J - d_0 r}{1 - r_\vartheta}, \quad A_1 = \frac{c_1 J - d_1 r}{1 - r_\vartheta}, \quad \dots, \quad A_n = \frac{c_n J - d_n r}{1 - r_\vartheta}$$

$$B_0 = \frac{e_0 J - f_0 r}{1 - r_\vartheta}, \quad B_1 = \frac{e_1 J - f_1 r}{1 - r_\vartheta}, \quad \dots, \quad B_n = \frac{e_n J - f_n r}{1 - r_\vartheta}.$$

Коефіцієнти поліномів (4) - (9), які в загальному випадку можна виразити функцією $Y(x) = y_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n$, визначаються за допомогою інтерполяційної формули Лагранжа [4]:

$$Y(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2) \dots (x_0 - x_n)} y_0 + \frac{(x - x_0)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2) \dots (x_1 - x_n)} y_1 + \dots + \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1})}{(x_n - x_0)(x_n - x_1) \dots (x_n - x_{n-1})} y_n \quad (12)$$

Так як в реальних умовах струм i змінюється в межах 0,3 – 2,5, а момент - в межах 0,1 – 3, то в поліномах (4) - (9) і, відповідно, в формулах (10) та (11) можна обмежитись $n=3$, що призводить до похибки розрахунків η не більше 2%. Проілюструємо викладене, приймаючи в якості магнітної універсальної характеристики характеристики двигуна ДНТ-46/33М електровозу К-14У. Значення величин $i, \varphi, \mu, 1/\varphi, i/\varphi$ в вузлах інтерполяції 0,1,2,3 наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Значення величин $i, \varphi, \mu, 1/\varphi, i/\varphi$ в вузлах інтерполяції 0,1,2,3

	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
i	0,5	1	1,5	2
φ	0,655	1	1,185	1,315
μ	0,3275	1	1,7775	2,63
$1/\varphi$	1,5267	1	0,8438	0,7604

i/φ	0,76335	1	1,2658	1,5209
-------------	---------	---	--------	--------

В загальному вигляді коефіцієнти поліномів визначаються за формулами:

$$a_0 = \frac{y_0 x_1 x_2 x_3}{g_0} - \frac{y_1 x_0 x_2 x_3}{g_1} + \frac{y_2 x_0 x_1 x_3}{g_2} - \frac{y_3 x_0 x_1 x_2}{g_3}$$

$$a_1 = - \frac{y_0 (x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3)}{g_0} + \frac{y_1 (x_0 x_2 + x_0 x_3 + x_2 x_3)}{g_1} - \frac{y_2 (x_0 x_1 + x_0 x_3 + x_1 x_3)}{g_2} + \frac{y_3 (x_0 x_1 + x_0 x_2 + x_1 x_2)}{g_3}$$

$$a_2 = \frac{y_0 (x_1 + x_2 + x_3)}{g_0} - \frac{y_1 (x_0 + x_2 + x_3)}{g_1} + \frac{y_2 (x_0 + x_1 + x_3)}{g_2} - \frac{y_3 (x_0 + x_1 + x_2)}{g_3};$$

$$a_3 = - \frac{y_0}{g_0} + \frac{y_1}{g_1} - \frac{y_2}{g_2} + \frac{y_3}{g_3},$$

де $g_0 = (x_3 - x_0)(x_2 - x_0)(x_1 - x_0);$ $g_1 = (x_3 - x_1)(x_2 - x_1)(x_1 - x_0);$
 $g_2 = (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)(x_2 - x_0);$ $g_3 = (x_3 - x_2)(x_3 - x_1)(x_3 - x_0).$

Значення коефіцієнтів поліномів (4) - (9) при $n=3$ наведені у таблиці 2.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів поліномів

	$k=0$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
a_k	0,0451	1,555	-0,74	0,14
b_k	0,39013	0,92497	-0,37478	0,059603
c_k	2,722	-3,2576	1,9328	-0,39715
d_k	0,5959	0,2393	0,218	-0,05323
e_k	2,0003	-1,7112	0,58759	-0,147
f_k	0,65071	0,33859	0,01907	-0,00836

Якщо підставити ці коефіцієнти у формули (10) та (11), то при $\rho_y = 0,03$, $\rho = \rho_y$ та $\vartheta = 1$ (природна характеристика) отримуємо:

$$n = 2,7878 - 3,3657i + 1,9864i^2 - 0,4078i^3; \quad (13)$$

$$n = 2,042 - 1,7746m + 0,8838m^2 - 0,1513m^3. \quad (14)$$

Якщо при $\rho_y = 0,03$ та $\vartheta = 1$ ввести у коло якоря номінальний опір ($\rho=1$), то отримаємо:

$$n = 2,1919 - 3,605i + 1,7678i^2 - 0,3546i^3; \quad (15)$$

$$n = 1,3913 - 2,1132m + 0,8647m^2 - 0,1429m^3. \quad (16)$$

На рисунку 1 наведені швидкісні характеристики двигуна ДНТ-46/33М електровозу К-14У, які побудовані за виразами (13), (15).

На рисунку 2 наведені механічні характеристики двигуна ДНТ-46/33М електровозу К-14У, які побудовані за виразами (14), (16).

В деяких випадках (наприклад, під час тягових розрахунків та розрахунків перехідних процесів пуску приводу) доцільно використовувати залежність моменту від швидкості у формі квадратного тричлена.

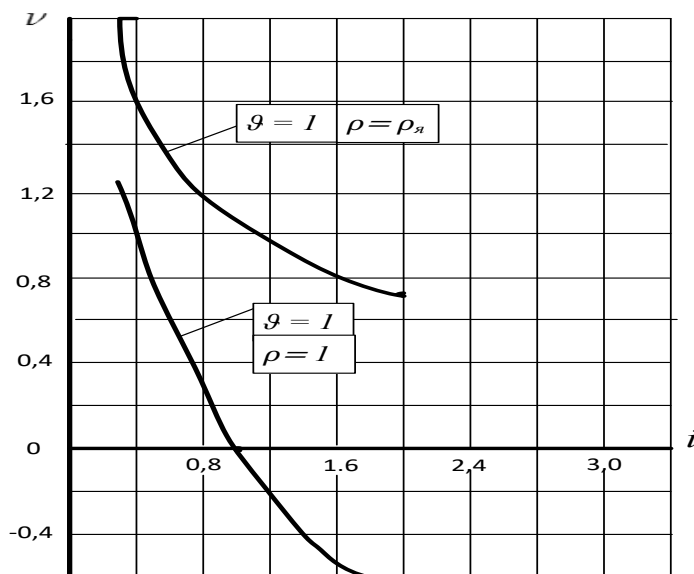


Рисунок 1. Швидкісні характеристики двигуна ДНТ-46/33М електровозу К-14У

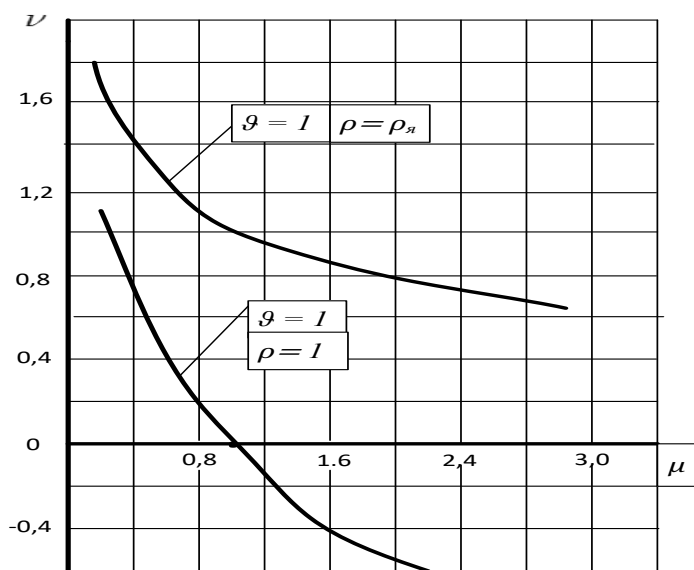


Рисунок 2. Механічні характеристики двигуна ДНТ-46/33М електровозу К-14У

При цьому b_0 , b_1 та b_2 визначаються також за допомогою поліному Лагранжа за залежністю (12) при $n = 2$. Тоді, вважаючи характеристику намагнічування відомою, будемо таблицю для заданих значень g і ρ :

Таблиця 3. i , φ , μ , в вузлах інтерполяції 0,1,2.

i	$i = i_0$	$i = i_1$	$i = i_2$
φ	$\varphi = \varphi_0$	$\varphi = \varphi_1$	$\varphi = \varphi_2$
μ	$\mu = \mu_0$	$\mu = \mu_1$	$\mu = \mu_2$
$n = \frac{u}{(1 - r_{\text{я}})j} - \frac{rm}{(1 - r_{\text{я}})j^2}$	$n = n_0$	$n = n_1$	$n = n_2$

Наведений метод побудови статичних електромеханічних характеристик можна використовувати і при інших схемах включення двигуна, в яких струм якоря і струм збудження не рівні ($i \neq i_3$).

В якості прикладу візьмемо схему, де якір двигуна шунтується додатковим опором. Приймаючи у відносних одиницях опір якоря $\rho_{\text{я}}$, додаткового резистора $\rho_{\text{д}}$ та струм у додатковому резисторі $i_{\text{д}}$, отримуємо:

$$i_3 = i + i_{\text{д}} = \frac{J + r_{\text{д}} i}{r_{\text{д}} + r_3} \quad (17)$$

$$n = \frac{\frac{r_{\text{д}}}{r_{\text{д}} + r_3} J - (r_{\text{я}} + \frac{r_{\text{д}} r_3}{r_{\text{д}} + r_3}) i}{(1 - r_{\text{я}} - r_3) j} \quad (18)$$

У цьому випадку для заданих значень J , $\rho_{\text{я}}$, ρ_3 та $\rho_{\text{д}}$, приймаючи за аргумент струм якоря i (враховуючи, що струм може мати від'ємні значення, оскільки в цій схемі можливі гальмівні режими) визначають:

$$i_3 = \frac{J + r_{\text{д}} i}{r_{\text{д}} + r_3}, \quad j = f(i_3), \quad m = j i, \quad \frac{1}{j} \quad \text{та} \quad \frac{i}{j}$$

в n вузлах інтерполяції. За значеннями цих величин визначають коефіцієнти поліномів (6) – (9) та коефіцієнти виразів (10) і (11).

Під час розрахунку перехідних процесів в електроприводі з двигунами послідовного збудження у ряді випадків необхідно враховувати індуктивність кола якоря. Однак, вказана індуктивність залежить від величини струму якоря.

Визначимо індуктивність кола якоря для випадку $i = i_3$. Тоді повна індуктивність кола L буде складатися з індуктивності якоря $L_{\text{я}}$ та індуктивності обмотки збудження L_3 (Lavrynenko Yu.M., Marchenko O.S., Savchenko P.I., Syniavskiy O.Iu., Voitiuk D.H., Lysenko V.P., 2009), (Vydmush A. A, Yaroshenko L. V., 2020)

$$L_{\text{я}} = b \frac{3U_{\text{н}}}{p w_{\text{н}} (2I_{\text{н}} + I_{\text{я}})} = \frac{b U_{\text{н}}}{p w_{\text{н}} I_{\text{н}}} \frac{3}{2 + i}, \quad (19)$$

$$L_3 = w_3 \frac{d(\Phi + \Phi_{\text{с}})}{dI_3}, \quad (20)$$

де β – постійний коефіцієнт ($\beta = 0,6$ для некомпенсованих та $\beta = 0,25$ для компенсованих двигунів);

p – число пар полюсів двигуна;

ω_3 – число послідовно з'єднаних витків обмоток збудження;

$\Phi_{\text{с}}$ – потік розсіювання.

Для отримання формули повної індуктивності кола якоря треба виконати наступні дії:

- замінюємо функцію $\frac{3}{2+i}$ що входить до виразу (19), її інтерполяційним виразом

$$g_0 + g_1 i + g_2 i^2 \quad (\text{при } 0 < i < 2,5, g_0 = 1,45, g_1 = -0,55, g_2 = 0,1);$$

- переходимо до відносних одиниць:

$$j = a_0 + a_1 i + a_2 i^2 + \dots + a_n i^n;$$

$j_s = s i$ де $s = 0,15, 0,2$ - коефіцієнт розсіювання;
- індуктивність якоря (номінальний режим):

$$L_{ян} = \frac{b U_n}{p w_n I_n};$$

- індуктивність обмотки збудження (номінальний режим):

$$L_{зн} = \frac{w_z \Phi}{I_n}.$$

Таким чином отримуємо наступну формулу повної індуктивності кола якоря:

$$L = L_0 + L_1 i + L_2 i^2, \quad (21)$$

де

$$\begin{aligned} L_0 &= g_0 L_{ян} + (a_1 + s) L_{зн}; \\ L_1 &= g_1 L_{ян} + 2 a_2 L_{зн}; \\ L_2 &= g_2 L_{ян} + 3 a_3 L_{зн}. \end{aligned}$$

В якості прикладу нижче наводяться результати розрахунку повної індуктивності кола якоря двигуна ДНТ-46/33М електровозу К-14У:

$$L = 0,05775 - 0,0432i + 0,0118i^2.$$

Таблиця 4. Результати розрахунку повної індуктивності кола якоря двигуна ДНТ-46/33М

i	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
$L, \Gamma\text{н}$	0,05775	0,0477	0,0391	0,032	0,02635	0,0212	0,0195	0,0183	0,018

Таким чином, під час збільшення струму i від 0 до 2 індуктивність двигуна зменшується приблизно у 3 рази, а при струмі $i > 2$ індуктивність двигуна можна вважати постійною.

Усі отримані вище характеристики отримані у припущенні, що напруга живлячої мережі U є постійною. В дійсності тягові двигуни отримують електроенергію через напівпровідниковий перетворювач, який має внутрішній еквівалентний опір, який буде впливати на форму електромеханічних характеристик двигунів. Розглянемо метод урахування цього опору на прикладі живлення тягових двигунів від мостового трифазного перетворювача.

Для живлення тягових контактних мереж підземної електровозної відкатки застосовується тягова підстанція типу АТП-500/275, яка комплектується разом з силовим трансформатором і пристроями управління і захисту в перетворювальний агрегат. Принципова схема тягового перетворювача представлена на рисунку 3.

Тяговий перетворювальний напівпровідниковий агрегат виготовляють у рудничному нормальному виконанні; за способом монтажу - стаціонарного виконання; номінальна напруга - 275 В; номінальний струм - 500 А; тип вентилів - ВК-200-6; за способом охолодження - примусове провітрювання; кількість вентилів - 12; захист від перевантаження і зовнішніх коротких замикань здійснюється середньошвидкісним автоматичним вимикачем типу АВ-10Б; захист від внутрішніх коротких замикань здійснюється швидкодіючими плавкими запобіжниками ПНБ-3; режим роботи - автоматичний з дистанційним управлінням. Вентильний блок ВБ зібраний по трифазній мостовій схемі (по два вентилі в плечі паралельно).

Зовнішня характеристика перетворювача має наступний вигляд (Zhemeriv H.H., Kovalchuk O.I., 2011):

$$u = 1 - di - \frac{2p}{3\sqrt{3}} n_{\theta}, \quad (22)$$

де

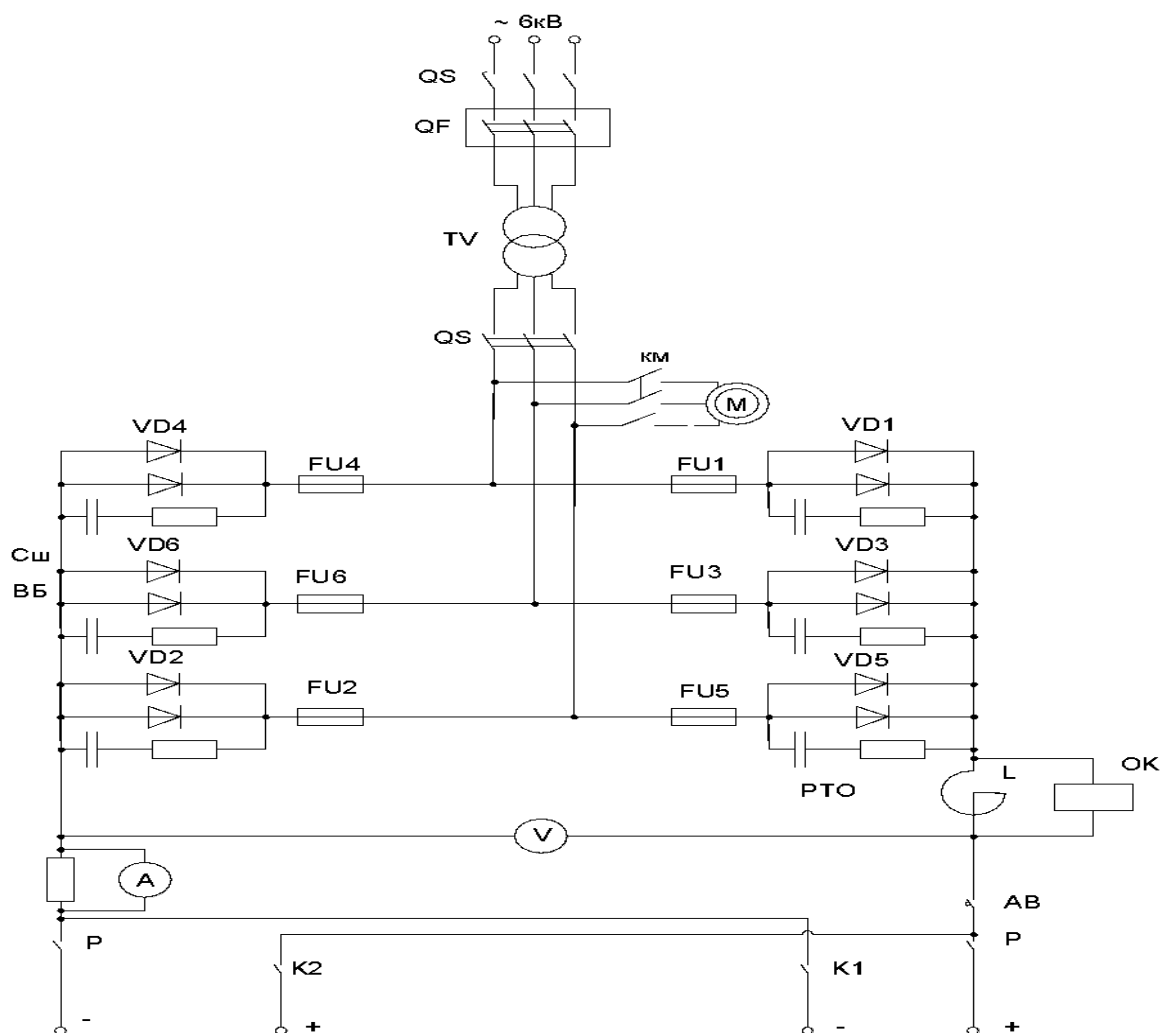
$$d = \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{0,65(r_k + r_{\theta})}{\sqrt{r_k^2 + 1}},$$

$$n_{\theta} = \frac{qU_0}{\sqrt{2}U} - \text{параметр порогової напруги вентилів одного плеча.}$$

У свою чергу $r_k = \frac{r_k}{x_k}$ - параметр режиму короткого замикання трансформатора;

$$r_{\theta} = \frac{qR}{nx_k} - \text{параметр динамічного опору вентилів одного плеча.}$$

Зовнішні характеристики перетворювача графічно наведена на рисунку 4 для значень ρ_k від 0 до 1:



Оскільки базові напруги та струми тягових двигунів та перетворювача різні, введемо коефіцієнт $x_0 = \frac{U_{d_0}}{U_n}$ та параметр $d_0 = dn_0 \frac{2z_k I_n}{p U_n}$, де U_n та I_n номінальні напруга та струм двигуна. Тоді для паралельного з'єднання тягових двигунів отримуємо наступні вирази швидкісної та механічної характеристик двигуна:

$$n = \frac{x_0 p n_\theta - (r + d_\theta)}{(1 - r_\theta) j}, \quad (23)$$

$$n = \frac{x_0 p n_\theta}{(1 - r_\theta) j} - \frac{(r + d_\theta) m}{(1 - r_\theta) j^2} \quad (24)$$

$$u = 1 - d i - \frac{2p}{3\sqrt{3}} n_\theta, \quad (25)$$

де

$$d = \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{0,65(r_\kappa + r_\theta)}{\sqrt{r_\kappa^2 + 1}},$$

$$n_\theta = \frac{q U_0}{\sqrt{2} U} - \text{параметр порогової напруги вентилів одного плеча.}$$

У свою чергу $r_\kappa = \frac{r_\kappa}{x_\kappa}$ - параметр режиму короткого замикання трансформатора;

$r_\theta = \frac{q R}{n x_\kappa}$ - параметр динамічного опору вентилів одного плеча.

Зовнішні характеристики перетворювача графічно наведена на рисунку 4 для значень ρ_κ від 0 до 1:

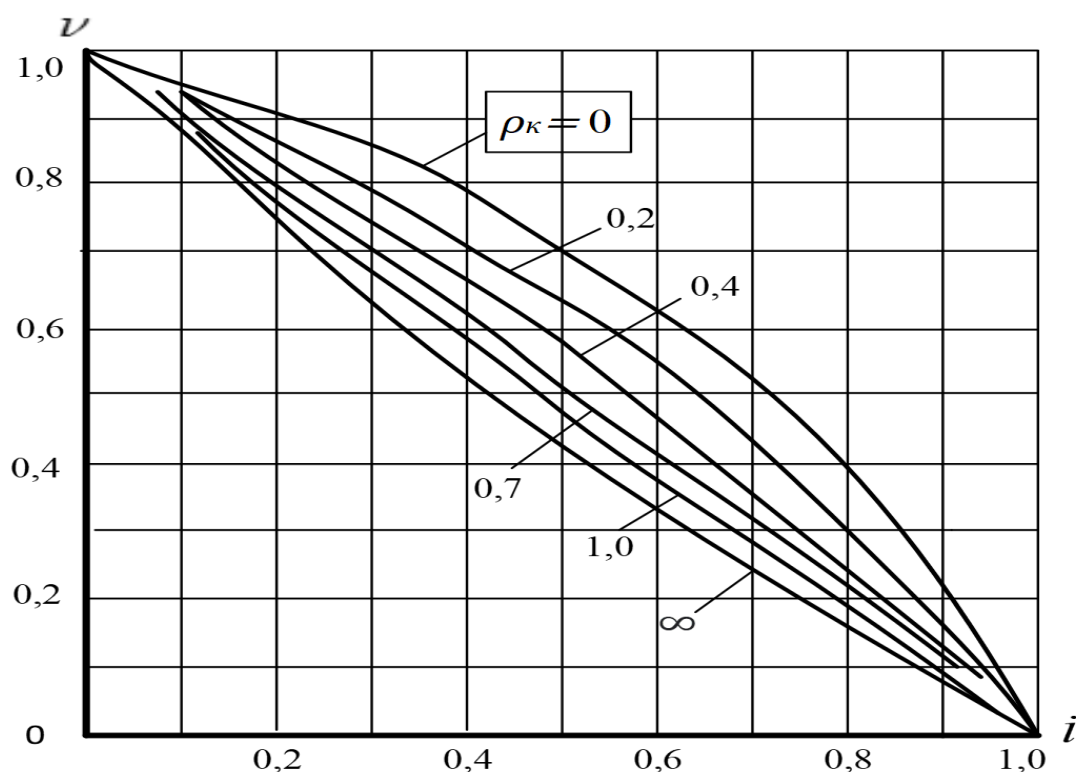


Рисунок 4. Зовнішні характеристики мостового трифазного перетворювача

Оскільки базові напруги та струми тягових двигунів та перетворювача різні, введемо

коефіцієнт $x_0 = \frac{U_{d_0}}{U_n}$ та параметр $d_\theta = d n_\theta \frac{2 z_\kappa I_n}{p U_n}$, де U_n та I_n номінальні напруга та струм

двигуна. Тоді для паралельного з'єднання тягових двигунів отримуємо наступні вирази швидкісної та механічної характеристик двигуна:

$$n = \frac{x_0 p n_e - (r + d_0)}{(1 - r_j) j}, \quad (26)$$

$$n = \frac{x_0 p n_e}{(1 - r_j) j} - \frac{(r + d_0) m}{(1 - r_j) j^2} \quad (27)$$

Вказані залежності (26), (27) відрізняються від (1), (2) тим, що тут $u = x_0 p n_e$

і що відносний опір двигуна дорівнює $r + d_0$. Тому для розрахунку цих характеристик можуть бути отримані коефіцієнти характеристик (10) та (11), які будуть функціями параметрів ρ_j, ρ та d_0 .

Висновки (Conclusions)

1. Запропонований аналітичний метод побудови електромеханічних характеристик тягового електропривода з двигунами постійного струму послідовного збудження.

2. Для реалізації аналітичного методу швидкісна та механічна характеристики представлена поліномами ступеню n , при цьому коефіцієнти поліномів визначалися за допомогою інтерполяційної формули Лагранжа.

3. Враховані під час аналітичної побудови електромеханічних характеристик залежність індуктивності кола якоря від величини струму якоря та зовнішня характеристика реального мостового трифазного перетворювача типу АТП-500/275, що живить шахтну контактну мережу, у всьому діапазоні струму навантаження.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на удосконалення аналітичної побудови електромеханічних характеристик під час живлення тягового електропривода з двигунами постійного струму послідовного збудження за системою широтноімпульсний перетворювач – тяговий двигун (ШПІ – ТД).

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування

Внесок авторів (Authors contribution)

- Аналітичні дані та аналіз - П. А, Х. В;
- Перевірка отриманих результатів, побудова діаграм, табличних значень - М. Є, О. Л.;
- Літературний огляд, редакція тексту - Л. Ю.
- Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Sarbajit Paul, Pil-Wan Han, Junghwan Chang, Yon-Do Chun, Jae-Gil Lee, State-of-the-art review of railway traction motors for distributed traction considering South Korean high-speed railway, Energy Reports, Volume 8, 2022, Pages 14623-14642, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.411>.
- Elektropryvod. Pidruchnyk. Lavrynenko Yu.M., Marchenko O.S., Savchenko P.I., Syniavskyi O.Iu., Voitiuk D.H., Lysenko V.P. - Vydavnytstvo «Lira-K». – K., 2009. – 504s.
- Milykh, V., Shavolkin O. Elektrotehnika. – Karavella, 2018.- 688s.
- Korn R., Korn T. Dovidnyk z matematyky dlia naukovtsiv ta inzheneriv (vyznachennia, teoremy, formuly). Prov. z 2-ho amerykanskooho vyd. Za red. Avramanovycha I.H. - M. Nauka, hol. red. FML, 1974. - 832 s.
- Kytaiev O.V., Hlukhova V.I. Pobudova pokaznykiv dvyhuniv postiinooho strumu za vidomymy danymy katalogu // Vestn. Khersonskoho nats. tekhn. un-tu. Ser. Elektronika ta elektrotehnika, - 2011. – Vyp.4(43) – S. 87-92.
- Milykh V.I. Elektrychni mashyny. – Karavella. 2013. – 452s.
- Vydmysh, A. A. Yaroshenko L. V.. Osnovy elektropryvoda. Teoriia ta praktyka. Chastyna 1. Navchalnyi posibnyk. – Vinnytsia: VNAU, 2020. – 387 s.
- Zhemeriv H.H., Kovalchuk O.I. Kharakterystyky potuzhnoho shestypulsnoho mostovoho nekerovanoho vypriamliacha z yemnisnym filtrom. Vestn. Kharkivskoho nats. tekhn. un-tu. Ser. Elektrotehnika ta elektromekhanika, - 2011. - №1 - S. 19-24.