



SCIENTIFIC AND
PRACTICAL JOURNAL

ECONOMICS AND TECHNICAL ENGINEERING

Vol. 3 No. 2 (2025)

ete.org.ua





Vol. 3 No. 2 (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 N7 dated December 25, 2025)

Mailing address: Zakhysnykiv Ukrainy 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 № 2 (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 N 7 від 25.12.2025)

Поштова адреса: площа Захисників України, 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, 2025
Статті в журналі публікуються під Creative Commons Attribution International BY.

CONTENTS

Economics

- 7 - 20 Global Trends in Corporate Procurement amid Digital Transformation and ESG principles**
Serhii Hushko, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Artem Shabliy, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 21 - 29 Innovative approaches to managing software companies in the digital economy**
Svitlana Vasylychak, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksandra Zhydiak, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Rauf Zeinalov, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 30 - 42 The global cryptocurrency market: empirical evidence and reflections on the green transition**
Iryna Maksymova, Assoc. Prof., DSc, State University of Economics and Technology, Ukraine
Iryna Yegorova, 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
- 43 - 54 Systemic Transition from a Linear to a Circular Model in the Context of Business Environment Transformation**
Oleksandr Bay, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 55 - 65 Forecasting Energy Market Dynamics with ARIMA approaches and Complex Network Indicators**
Andrii Bielinskyi, Assoc. lecturer, Postgr, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Victoria Solovieva, Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Viktoriia Radko, Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Maksym Seleznov, Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Tetiana Pavlysh, Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

Technical engineering

- 66 - 77 Investigation of the Influence of Alkali Metal Compounds on the Durability of the Grate Bar Field of Conveyor Machines During Iron Ore Pellet Firing**
Hanna Panchenko, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Andrii Ivanov, Deputy Head of the Pelletizing Plant, PrJSC "Central Iron Ore Enrichment Works", Kryvyi Rih, Ukraine
Nataliia Suslo, Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Yelyzaveta Huk, Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

- 78 - 89 Analytical studies of the operation of a vertically directed vibratory-magnetic separator**
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
- 90 - 100 Polyhydric Alcohols as Promising Eco-Friendly Binders for Coal Blend Preparation in Coking Technology**
Kateryna Shmeltser, Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Maryna Kormer, Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Natalia Desna, Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 101-110 Digital measurement of shaft rotation speed based on encoder signal: error analysis and adaptive method**
Oleksandr Lytovchenko, Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Yuliia Lytovchenko, Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Viacheslav Khyzhniak, 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

ЗМІСТ

Економіка

- 7 - 20 Глобальні тенденції корпоративних закупівель в умовах цифрової трансформації та принципів ESG**
Serhii Hushko, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Artem Shabliy, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 21 - 29 Інноваційні підходи до управління software-компаніями в умовах цифрової економіки**
Svitlana Vasylychak, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksandra Zhydiak, Prof. DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
Rauf Zeinalov, Postgr, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
- 30 - 42 The global cryptocurrency market: empirical evidence and reflections on the green transition**
Iryna Maksymova, Assoc. Prof., DSc, State University of Economics and Technology, Ukraine
Iryna Yegorova, 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
- 43 - 54 Systemic Transition from a Linear to a Circular Model in the Context of Business Environment Transformation**
Oleksandr Bay, Postgr., State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

55 - 65 Forecasting Energy Market Dynamics with ARIMA approaches and Complex Network Indicators

Andrii Bielinskyi, Assoc. lecturer, Postgr, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

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

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

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

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

Технічна інженерія

66 - 77 Дослідження впливу сполук лужних металів на стійкість колосникового поля конвеєрних машин при обпаленні залізрудних окатишів

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

Andrii Ivanov, Deputy Head of the Pelletizing Plant, PrJSC "Central Iron Ore Enrichment Works", Kryvyi Rih, Ukraine

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

Yelyzaveta Huk, Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

78 - 89 Аналітичні дослідження роботи вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії

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

90 - 100 Перспективи застосування багатоатомних спиртів як ефективних екологічних зв'язуючих у технології підготовки вугільної шихти для коксування

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

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

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

101 - 110 Цифрове вимірювання швидкості обертання валу на базі сигналу енкодера: аналіз похибок і адаптивний метод

Oleksandr Lytovchenko, Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

Yuliia Lytovchenko, Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

Viacheslav Khyzhniak, 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



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.2025.03.02.01

Global Trends in Corporate Procurement amid Digital Transformation and ESG principles

Citation:

Hushko, S., & Shabliy A. (2025). Global Trends in Corporate Procurement amid Digital Transformation and ESG principles. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", Vol.3 No.2 (2025), 7–20. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.01>

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*

Artem Shabliy

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

e-mail: shablii_av_23568@kneu.dp.ua

 *ORCID ID: 0009-0003-5844-3103*

Abstract: This article identifies and systematizes the global trends shaping corporate procurement in the context of digital transformation and the growing importance of ESG principles in strategic management. The analytical basis of the study draws on the consolidated results of an international survey conducted by the Chartered Institute of Procurement & Supply, which covered 122 organizations from different countries and allowed for a comprehensive assessment of the current state, challenges and transformation vectors of the procurement function. The findings demonstrate that procurement increasingly moves beyond its traditional operational role and becomes a strategic driver of business resilience and sustainability, influencing cost management, supply chain transparency and long-term value creation. Digitalization is shown to be the key catalyst of this transformation. The adoption of artificial intelligence, advanced analytics, cybersecurity solutions and supplier relationship management systems enhance transparency, predictive accuracy and the overall quality of decision-making. Although full digital integration is still characteristic of only a small proportion of companies, the majority are undergoing active technological modernization, gradually shifting towards data-driven and automated procurement models. Simultaneously, the principles of sustainable development and ESG are becoming embedded in procurement policies and practices. Organizations increasingly prioritize environmental criteria, ethical sourcing, labor standards and responsible supplier behavior, recognizing their impact on corporate resilience and stakeholder trust. The integration of ESG processes strengthens institutional sustainability and redefines performance metrics within supply chains. The study concludes that the synergy between digitalization and ESG represents a defining direction for the evolution of modern procurement. Their combined influence sets new standards for responsible, transparent and analytically supported supply management in the global economy, positioning procurement as a central mechanism for achieving long-term corporate sustainability and strategic competitiveness.

Received: 12/12/2025

Accepted: 18/12/2025



Keywords: corporate procurement, supply chain, digital transformation, ESG, green transition, business, procurement management, organizational resilience, sustainable development.

JEL: Q56, M14, L21, O52

Global Trends in Corporate Procurement amid Digital Transformation and ESG principles

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

Artem Shablii

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

e-mail: shablii_av_23568@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0003-5844-3103

Abstract: This article identifies and systematizes the global trends shaping corporate procurement in the context of digital transformation and the growing importance of ESG principles in strategic management. The analytical basis of the study draws on the consolidated results of an international survey conducted by the Chartered Institute of Procurement & Supply, which covered 122 organizations from different countries and allowed for a comprehensive assessment of the current state, challenges and transformation vectors of the procurement function. The findings demonstrate that procurement increasingly moves beyond its traditional operational role and becomes a strategic driver of business resilience and sustainability, influencing cost management, supply chain transparency and long-term value creation. Digitalization is shown to be the key catalyst of this transformation. The adoption of artificial intelligence, advanced analytics, cybersecurity solutions and supplier relationship management systems enhances transparency, predictive accuracy and the overall quality of decision-making. Although full digital integration is still characteristic of only a small proportion of companies, the majority are undergoing active technological modernization, gradually shifting towards data-driven and automated procurement models. Simultaneously, the principles of sustainable development and ESG are becoming embedded in procurement policies and practices. Organizations increasingly prioritize environmental criteria, ethical sourcing, labor standards and responsible supplier behavior, recognizing their impact on corporate resilience and stakeholder trust. The integration of ESG processes strengthens institutional sustainability and redefines performance metrics within supply chains. The study concludes that the synergy between digitalization and ESG represents a defining direction for the evolution of modern procurement. Their combined influence sets new standards for responsible, transparent and analytically supported supply management in the global economy, positioning procurement as a central mechanism for achieving long-term corporate sustainability and strategic competitiveness.

Keywords: corporate procurement, supply chain, digital transformation, ESG, green transition, business, supply chains, procurement management, organizational resilience, sustainable development.

Глобальні тенденції корпоративних закупівель в умовах цифрової трансформації та принципів ESG

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

Артем Шаблій

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

e-mail: shablii_av_23568@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0003-5844-3103

Анотація: У статті визначено та систематизовано глобальні тенденції розвитку корпоративних закупівель в умовах цифрової трансформації та посилення ролі ESG-принципів у стратегічному управлінні. Аналітична база дослідження ґрунтується на опрацюванні узагальнених результатів міжнародного опитування, проведеного CIPS, що охопило 122 організації з різних країн світу. Це дозволило комплексно оцінити сучасний стан закупівельної функції корпорацій, ключові виклики та напрями її трансформації. Показано, що закупівлі виходять за межі традиційної операційної діяльності та дедалі більше впливають на формування стійкості та сталості бізнесу, управління витратами та розвиток ланцюгів постачання. Встановлено, що цифровізація є ключовим каталізатором модернізації закупівель. Використання штучного інтелекту, аналітичних платформ, рішень із кіберзахисту та систем управління постачальниками підвищує прозорість, точність прогнозування та ефективність управлінських рішень. Попри те, що повна диджиталізація характерна лише для незначної частки компаній, більшість організацій перебувають у фазі активного технологічного оновлення. Паралельно визначено, що принципи сталого розвитку та ESG стають структурною складовою закупівельної політики. Зростає увага до екологічних критеріїв, етичних практик, відповідальності постачальників і прозорості ланцюгів постачання, що підсилює корпоративну стійкість, сприяє сталості і формує довгострокову цінність компаній. Синергія диджиталізації та ESG-принципів окреслена як ключовий напрям розвитку сучасних закупівель, що визначає нові стандарти відповідального, прозорого та дата-орієнтованого управління системою постачання у світовій економіці.

Ключові слова: корпоративні закупівлі, постачання, цифрова трансформація, ESG, зелений перехід, бізнес, ланцюги постачання, управління закупівлями, організаційна стійкість, сталий розвиток.

Вступ (Introduction)

У сучасних умовах стрімкої трансформації світової економіки корпоративні закупівлі перетворюються на одну з ключових стратегічних функцій підприємств, що визначає їхню здатність забезпечувати конкурентоспроможність, стійкість та інноваційність. Роль закупівель давно вийшла за межі операційного забезпечення ресурсами: сьогодні це механізм формування довгострокової цінності, управління ризиками та реалізації принципів сталого розвитку. Зміни, що відбуваються у світовому середовищі, підсилюють цю тенденцію та створюють нові вимоги до функціонування закупівельних підрозділів.

Сучасні фахівці із закупівель працюють у контексті зростаючої геополітичної нестабільності, інфляційного тиску, порушень ланцюгів постачання та дефіциту кваліфікованої робочої сили. Саме тому функція корпоративних закупівель демонструє безпрецедентне посилення впливу (*Zope et al., 2025; Roy et al., 2025*). За узагальненими даними світових аналітичних оглядів, близько 70% провідних компаній засвідчують зростання ролі закупівель у підвищенні ефективності витрат і стратегічному управлінні (*CIPS, 2024*). Одночасно виявляється структурна невідповідність між зростанням відповідальності закупівельних підрозділів і рівнем їхньої інтегрованості у процеси стратегічного ухвалення рішень: у частини організацій вони тісно пов'язані з керівництвом, тоді як в інших – залишаються периферійними щодо управлінських центрів (*Bányainé Tóth, 2024*).

Паралельно зі зростанням впливу відбувається суттєва переорієнтація закупівель на завдання сталого розвитку. Міжнародні компанії відзначають посилення значущості екологічних, соціальних та управлінських ESG принципів у своїй діяльності, що формує нові стандарти відповідальності та прозорості ланцюгів постачання (*Wang et al., 2025; Basiru et al., 2023*). Більш того, саме закупівлі дедалі частіше виконують роль інструменту екологічної модернізації бізнесу та джерела впливу на зниження вуглецевого сліду (*Bogdan et al., 2025; Onukwulu et al., 2025; Karaman et al., 2024*). Важливо зазначити, що провідну роль у цьому відіграє вплив закупівель та поведінку постачальників та її своєрідне регулювання (*Huang et al., 2025*). Зростає і потреба у нових компетенціях (*Silva & Romaro, 2024*): майже половина

керівників підрозділів закупівель указують на намір розвивати навички у сфері сталого розвитку, а також лідерства та партнерської взаємодії.

Цифрова трансформація стає ще одним визначальним чинником еволюції корпоративних закупівель. Розвиток автоматизації, систем аналітики, цифрових платформ та штучного інтелекту формує умови для переходу до моделі «Procurement 2.0» (*Hushko & Shablii, 2025*). Попри те, що автоматизація досі фрагментарно охоплює лише частку закупівельних функцій, більш ніж половина організацій декларують прагнення до ширшого впровадження цифрових інструментів у найближчій перспективі (*Esan et al., 2022*). Водночас, практика свідчить, що автоматизація не усуває потребу в людському факторі, а навпаки – підсилює значення компетенцій, пов'язаних із міжособистісною взаємодією, комунікацією та управлінням відносинами з постачальниками.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що глобальні тенденції у сфері корпоративних закупівель формуються під впливом трьох взаємопов'язаних домінант:

1) цифрової трансформації, яка радикально змінює технологічну основу процесу прийняття рішень;

2) ESG-орієнтованого управління, що підсилює роль етичності, екологічності та відповідальності в ланцюгах постачання;

3) зростання стратегічного впливу закупівель, які дедалі більше визначають здатність компаній адаптуватися до глобальних шоків та еволюції ринкових умов.

У цьому контексті дослідження глобальних тенденцій у корпоративних закупівлях набуває особливої актуальності. Воно дозволяє окреслити ключові напрями трансформації, виявити структурні суперечності та визначити перспективні моделі розвитку функцій закупівель у постіндустріальній цифровій економіці, де принципи сталості та технологічної інноваційності стають фундаментом конкурентних переваг.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Методологічна основа дослідження сформована на поєднанні якісних та кількісних аналітичних підходів, що дозволило комплексно оцінити глобальні тенденції розвитку корпоративних закупівель в умовах цифрової трансформації та посилення значущості ESG-принципів.

Емпіричну базу становлять дані першого глобального аналітичного звіту Global State of Procurement & Supply (CIPS, 2024), який узагальнює результати міжнародного опитування 122 організацій із різних регіонів світу. Статистичні матеріали звіту охоплюють такі ключові аспекти функціонування закупівельної діяльності: ступінь цифрової трансформації й автоматизації, роль закупівель у стратегічному управлінні, інтеграція ESG-принципів, структура витрат, управління ризиками, оцінка взаємодії з постачальниками та рівень організаційної стійкості ланцюгів постачання.

У межах дослідження застосовано такі методи: критичний аналіз і синтез (дали змогу інтерпретувати статистичні дані звіту через призму сучасних теоретичних підходів до управління ланцюгами постачання, моделей цифрової трансформації та концепцій сталого розвитку); вторинний кількісний аналіз даних (опрацювання агрегованих результатів міжнародного опитування здійснювалося із використанням структурування відповідей, порівняння частотних характеристик, аналізу перерозподілу впливу закупівель у різних категоріях витрат та оцінки рівня цифрової зрілості компаній); порівняльний аналіз (визначення відмінностей за технологічною зрілістю та ESG-орієнтованістю); структурно-функціональний аналіз (дозволив визначити роль закупівель у системі корпоративного управління, їх вплив на розподіл ресурсів, формування стійкості бізнесу); інтерпретаційна аналітика (пояснення виявлених закономірностей).

Застосування зазначених методів дозволило вибудувати цілісну логіку дослідження:

- на першому етапі здійснено опрацювання емпіричних даних та їх систематизацію;

- на другому етапі проведено порівняльний аналіз та ідентифікацію ключових трендів;
- на третьому етапі результати інтерпретовано у контексті сучасних теоретичних підходів до цифрової трансформації, управління ланцюгами постачання та сталого розвитку;
- на четвертому етапі сформульовано висновки щодо структурних змін, викликів та перспектив розвитку закупівельної функції у цих умовах.

Репрезентативність використаної емпіричної бази підтверджується широкою географією респондентів: Велика Британія та Ірландія (45%), Австралія та Нова Зеландія (17%), Близький Схід та Африка (17%), континентальна Європа (15%). Респонденти представляли різні сектори економіки — державний сектор, будівництво, виробництво, енергетику, ІТ, охорону здоров'я, транспорт та інші галузі. Це забезпечує можливість узагальнення отриманих висновків на глобальному рівні.

Результати (Results)

Контекст функціонування корпоративних закупівель у сучасній економіці є надзвичайно складним та багатовимірним. На діяльність закупівельних і постачальних підрозділів істотно впливають інфляційні процеси, геополітична напруженість, порушення транспортної інфраструктури, нестача кваліфікованої робочої сили та зростання конкуренції на глобальних ринках. Перебої в логістиці, спричинені регіональними конфліктами, а також структурна напруга у міжнародній торгівлі формують середовище постійної невизначеності, в якому саме закупівельна функція відіграє ключову роль у забезпеченні адаптивності та стійкості бізнесу.

У таких умовах значення закупівель як стратегічного інструмента зростає. Практика свідчить, що фахівці із закупівель дедалі частіше відіграють роль інтеграторів бізнес-процесів і стають важливою ланкою між внутрішньою організаційною структурою та зовнішнім ринковим середовищем. Їхній доступ до різнопланової інформації (щодо цінкових тенденцій, технологічних можливостей, особливостей постачальницьких ринків та ін.) забезпечує унікальну видимість, яка недоступна іншим підрозділам в корпораціях. Це підсилює роль департаментів з постачання у прийнятті стратегічних рішень, оцінці ризиків та формуванні довгострокових сценаріїв розвитку бізнесу.

Зміна сприйняття професії закупівельника пояснюється, передусім, усвідомленням того, що саме ця функція має найбільший потенціал формувати відповідальну поведінку бізнесу. Аналітичні дані свідчать, що закупівельні підрозділи дедалі частіше беруть участь у вирішенні питань, пов'язаних із забезпеченням етичності ланцюгів постачання, протидією недобросесним практикам, підтримкою принципів сталого розвитку та сприянням соціальній відповідальності організацій (*Wadhwa et al., 2024*). У багатьох випадках саме закупівлі стають першою точкою виявлення ризиків, що стосуються трудових прав, екологічних наслідків чи можливих корупційних загроз (*Otieno & Otero, 2023*). Таким чином, вони визначають траєкторію дій компанії.

Фахівці з постачання наголошують на здатності закупівель впливати на широкий спектр соціальних та економічних процесів, які стосуються не тільки поліпшення умов праці у ланцюгах поставок, але й мінімізації негативного впливу виробничих процесів на довкілля. Відтак, закупівлі можуть бути потужною силою позитивних змін, оскільки рішення у цій сфері впливають на мільярди інвестицій та мільйони робочих місць у глобальній економіці.

Разом із тим, попри зростання впливу закупівельної функції, виявляється низка інституційних суперечностей. Зокрема, посилення відповідальності та зростання очікувань щодо закупівель не завжди супроводжуються достатнім рівнем інтеграції у систему корпоративного управління. Не в усіх організаціях закупівельні підрозділи мають належне представництво в управлінських структурах, що знижує ефективність їх впливу на стратегічні рішення та обмежує комунікацію з вищим керівництвом. Така невідповідність між фактичним

і формальним статусом створює бар'єри для реалізації закупівельної функції як ключового елемента сталого та інноваційного розвитку.

Важливим проявом трансформації сфери закупівель є розширення категорій, у яких фахівці здійснюють управлінський вплив. Сьогодні закупівлі охоплюють не лише традиційні статті витрат, такі як офісні матеріали чи базові послуги, але й комплексні стратегічні напрямки: управління інфраструктурою, IT-послуги та обладнання, капітальні інвестиції, логістичні операції, енергетичні ресурси, використання зовнішнього персоналу, забезпечення безпеки, професійні та консалтингові послуги. Це свідчить про поступову інтеграцію закупівельної функції у всі ключові аспекти операційної та стратегічної діяльності організації.

Структуру впливу закупівель на витрати за окремими категоріями наведено на діаграмі (Рис. 1).

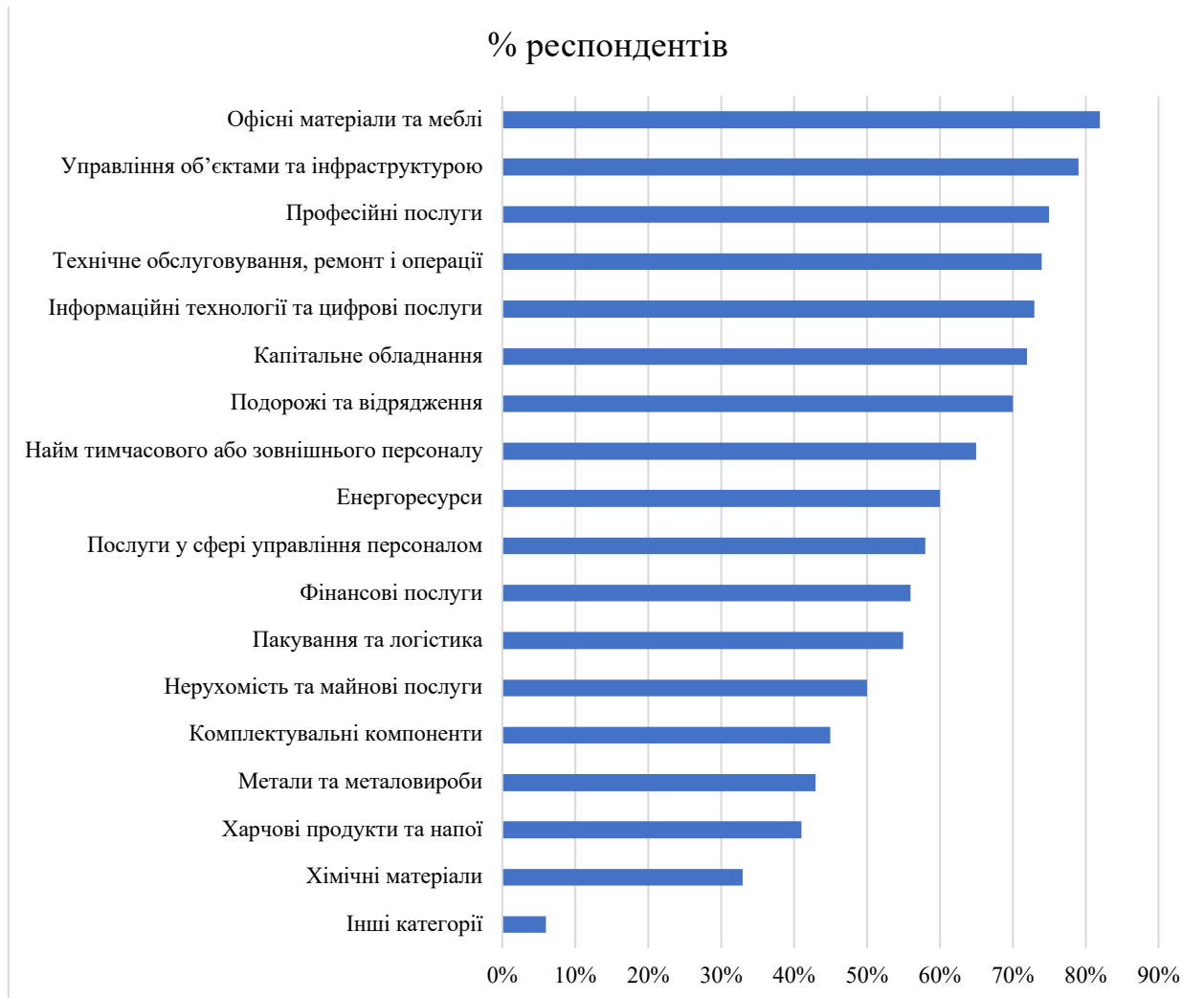


Рисунок 1. Вплив закупівель на витрати (за сферами закупівель корпорацій)

Джерело: авторська розробка на основі відкритої аналітики (CIPS, 2024)

Аналіз цієї структури впливу демонструє, що найвищий рівень «імпакту» зосереджено у сферах із високим рівнем стандартизації та повторюваності (офісне забезпечення, управління об'єктами, професійні послуги, технічне обслуговування). Значно нижчий вплив спостерігається у категоріях, пов'язаних із сировинними ринками та товарами з високою волатильністю (харчові продукти, хімічні матеріали, окремі види сировини). Такий розподіл підтверджує, що закупівлі стикаються із суттєво різними рівнями ризику й непередбачуваності залежно від характеру категорії витрат, що вимагає адаптивних стратегій управління.

Закупівельні підрозділи перебувають у унікальному положенні, оскільки взаємодіють практично з усіма функціональними напрямками бізнесу та бачать цілісну картину розподілу

ресурсів. Саме ця міжфункціональна взаємодія дає змогу фахівцям із закупівель координувати витратні рішення на рівні всієї організації, забезпечуючи прозорість потоків ресурсів і формування цілісної фінансової стратегії.

Аналіз отриманих даних також свідчить, що значна частка загальних організаційних витрат концентрується саме в тих категоріях, які перебувають під безпосереднім контролем закупівельних команд. Поширеною є ситуація, коли закупівлі управляють або мають вирішальний вплив на понад 60% витрат, пов'язаних із придбанням прямих товарів і послуг. Найбільший рівень контролю характерний для категорій із високим рівнем стандартизації та повторюваності: офісні матеріали та меблі (близько 80%), управління об'єктами (приблизно 78%), професійні послуги (близько 74%), що узгоджується зі структурою впливу, наведеною на рисунку 1.

Важливо, що вплив закупівель не обмежується окремими категоріями, а поширюється на всю систему витрат. Закупівлі дедалі більше визначають загальний рівень ефективності фінансового управління в організаціях. Зміна ринкової кон'юнктури (різкі коливання вартості сировини, непередбачувані логістичні витрати, інфляційний тиск) підсилює роль закупівель як ключового механізму компенсації зовнішніх ризиків. В окремих галузях фіксується надзвичайно висока волатильність: зокрема, зростання цін на спеціалізовані компоненти може перевищувати 400% (*Ascari et al., 2024*). Це потребує оперативної реакції закупівельних функцій та впровадження стратегій контрінфляційного управління.

Показово, що в умовах зростання вартості ресурсів та загальної економічної нестабільності наради директорів дедалі частіше звертаються до закупівель як до інструмента стратегічної стабілізації витрат. Це зумовлено тим, що фахівці із закупівель здатні виявляти потенціал для оптимізації вартості, переукладати контракти, здійснювати перемовини щодо умов постачання, виявляти дублювання витрат та впроваджувати стандартизацію категорій. У професійному середовищі неодноразово підкреслюється, що «усі ключові дискусії сьогодні точаться навколо витрат» (*Domingos et al., 2025*), оскільки саме від їхнього ефективного управління залежить конкурентоспроможність підприємств на глобальному ринку.

Однією з ключових тенденцій у розвитку сучасних корпоративних закупівель є перегляд організаційних моделей, у межах яких функціонує система постачання. Поширюється практика їхньої трансформації у напрямі більшої інтегрованості з бізнес-стратегією, підзвітності на рівні топменеджменту та цифровізації процесів. Закупівлі перестають розглядатися як допоміжна або суто операційна функція – вони стають центром даних, аналітики та стратегічного управління ризиками, що потребує відповідного підсилення їхнього статусу в організаційній структурі. Встановлено, що участь закупівель у процесах корпоративного управління все ще залишається недостатньою. Істотним індикатором цієї проблеми є той факт, що лише близько однієї п'ятої організацій забезпечують представництво старшого фахівця із закупівель у раді директорів (*Gunawan & Mutaqin, 2024*). Така диспропорція свідчить про відсутність системної інтеграції закупівель до стратегічного центру прийняття рішень, що може обмежувати можливості компанії реагувати на ризики, підсилювати прозорість ланцюгів постачання та впроваджувати ESG-принципи. Характер підпорядкування закупівельних підрозділів суттєво коливається. Найчастіше закупівлі підпорядковуються фінансовому директору, що становить приблизно дві третини структур у деяких країнах, тоді як в інших регіонах спостерігається більша різноманітність моделей: підпорядкування генеральному директору, операційному директору (близько 28%) або іншим керівним особам.

На рисунку 2 представлено оцінку рівня уваги, яку топ-менеджмент приділяє внеску закупівель у корпоративні рішення, зокрема в питаннях сталого розвитку та цифрової трансформації.

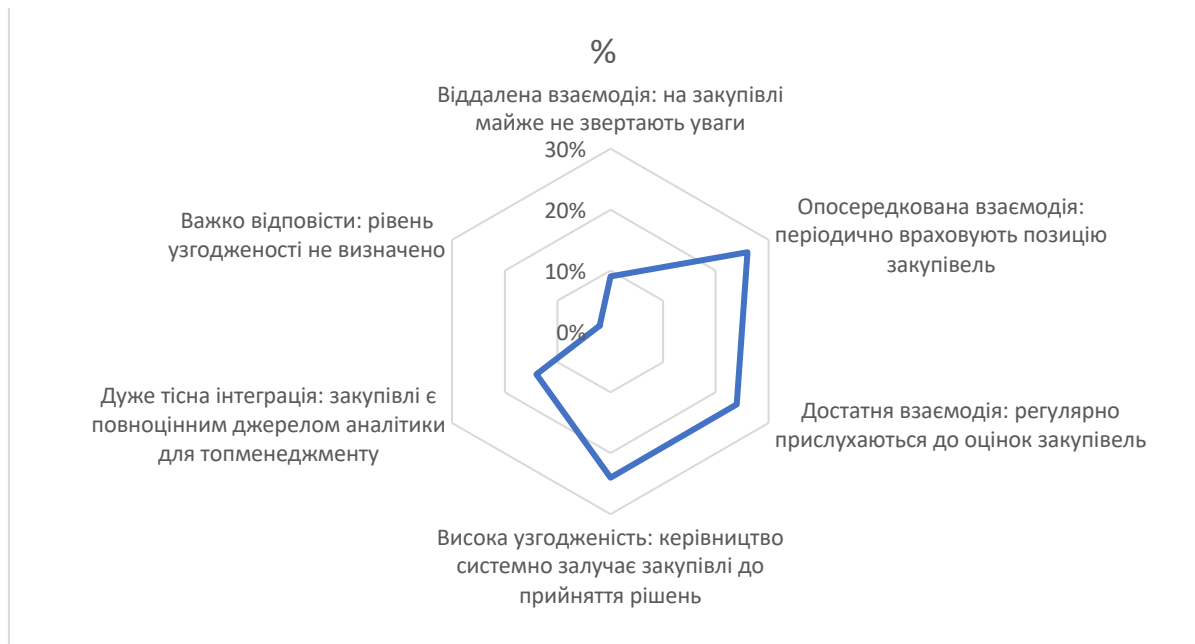


Рисунок 2. Ступінь узгодженості функції корпоративних закупівель із керівництвом в умовах цифрової трансформації та інтеграції ESG

Джерело: авторська розробка на основі відкритої аналітики (CIPS, 2024)

Такий розподіл показує, що організаційні моделі закупівель перебувають у стані активної трансформації. Зростає потреба:

- у підвищенні формального статусу закупівель у корпоративній структурі;
- у переході до вертикалі підпорядкування, яка забезпечує стратегічну роль;
- у цифровізації процесів, що дозволяє створювати інтегровані системи управління витратами, ризиками та стійкістю;
- у формуванні тіснішого партнерства між закупівлями та вищим керівництвом.

Цифрова трансформація відіграє ключову роль у цих змінах, оскільки саме вона забезпечує підґрунтя для підвищення прозорості, доказового прийняття рішень та ефективної інтеграції закупівель у стратегічну архітектуру бізнесу.

Водночас, одним із провідних трендів розвитку сучасних систем закупівель є зростання інвестицій у цифрові технології та автоматизацію. Підприємства розглядають технологічні рішення як основу для переходу до нових моделей управління ресурсами, що здатні забезпечити швидкість, точність і стійкість у мінливих ринкових умовах. Особливо активно до технологічних трансформацій залучаються великі компанії, у яких масштаби операцій вимагають високого рівня стандартизації та прозорості.

Значна частина організацій планує збільшення фінансових вкладень у штучний інтелект, який розглядається як ключовий рушій автоматизації складних процесів: від прогнозування попиту і цінових коливань до автоматизованого сорсингу та оцінювання ризиків постачальників. Зафіксовано, що приблизно 35% компаній у найближчий рік орієнтуються на нарощення інвестицій у ШІ, що свідчить про зміщення акцентів із реактивного на проактивне управління закупівлями. Суттєвим інвестиційним напрямом є також кібербезпека, яку посилюватимуть близько 30% організацій. Це пов'язано зі швидким розширенням цифрової інфраструктури закупівель, зростанням обсягів оброблюваних даних та необхідністю захисту ланцюгів постачання від кібервразливостей. Кібербезпека стає інтегрованим елементом закупівельної діяльності, адже компрометація даних у сфері постачання може мати системний вплив на фінансову та операційну безпеку підприємства.

У фокусі трансформації залишаються й системи управління відносинами з постачальниками, які розглядаються як один із найбільш перспективних напрямів розвитку. Компанії очікують, що інвестиції в такі системи дозволять підвищити якість аналітики,

автоматизувати моніторинг відповідності постачальників вимогам ESG, пришвидшити ухвалення рішень та підвищити точність контрольних показників у реальному часі. Проте, впровадження цих рішень потребує значних ресурсів, що ускладнює цифрову трансформацію для організацій із нижчим рівнем технологічної зрілості (Maksymova, 2024).

Цифрові технології також розглядаються як засіб оптимізації витрат та підвищення стійкості. Інтеграція інструментів штучного інтелекту, автоматизованого сорсингу, роботизованої обробки запитів, систем прогнозування та аналітики ризиків забезпечує можливість швидко адаптуватися до змін зовнішнього середовища. Крім того, технології сприяють зміцненню етичних та екологічних стандартів, оскільки дозволяють забезпечувати комплексний контроль відповідності постачальників вимогам сталого розвитку.



Рисунок 3. Пріоритетні напрями інвестицій у систему закупівель та постачання
Джерело: авторська розробка на основі відкритої аналітики (CIPS, 2024)

Як бачимо, три стратегічні напрями інвестування окреслюють ключову логіку трансформації сучасних закупівель.

По-перше, екологізація та стійкість виступають фундаментом модернізації: сталий розвиток, який охоплює 68% інвестиційних пріоритетів, свідчить про перехід до моделі, орієнтованої на принципи ESG, відповідальність та створення довгострокової цінності.

По-друге, цифровізація та автоматизація формують нову архітектуру закупівельних процесів. Зростання інтересу до цифрових технологій, штучного інтелекту та кібербезпеки демонструє прагнення компаній вибудовувати технологічно інтегровану екосистему, здатну до аналітичної самодіагностики, оптимізації витрат та гнучкого реагування на зовнішні ризики.

По-третє, розвиток людського капіталу і стратегічних компетенцій стає критичним чинником успіху: вдосконалення професійних навичок персоналу та поглиблення стратегічного сорсингу підкреслюють, що ефективність цифрової трансформації визначається не лише технологічними рішеннями, а насамперед управлінським потенціалом закупівельних команд та їх здатністю реалізовувати стратегічні зміни.

Важливо зазначити, що повна диджиталізація функцій закупівель та постачання є дуже рідкісним явищем у компаніях (Рис. 4).

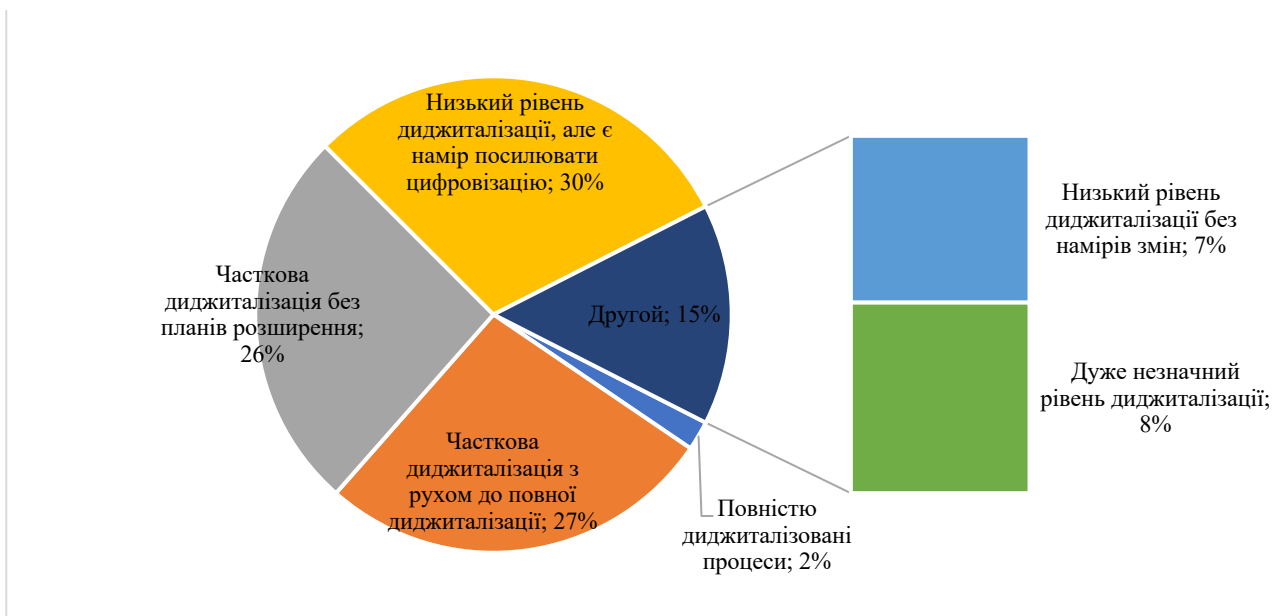


Рисунок 4. Рівні диджиталізації закупівельних процесів в компаніях
Джерело: авторська розробка на основі відкритої аналітики (CIPS, 2024)

Структура рівнів диджиталізації свідчить про те, що цифрова трансформація закупівель перебуває на етапі активного, але нерівномірного розвитку. Лише 2% організацій досягли повної диджиталізації, що підкреслює високий рівень технологічної складності та значні вимоги до інтегрованих цифрових систем управління закупівлями.

Найбільша частка компаній перебуває у проміжних станах цифрової зрілості. Приблизно 27% підприємств характеризуються частковою диджиталізацією та рухаються в напрямі повного цифрового охоплення процесів, впроваджуючи сучасні цифрові платформи, аналітику та інтелектуальні рішення для управління ланцюгами постачання. Ще 26% перебувають у стані часткової диджиталізації, однак наразі не планують суттєвого розширення її масштабу — це вказує на наявність базової цифрової інфраструктури без стратегічного наміру до подальшої модернізації.

Водночас 30% організацій демонструють низький рівень диджиталізації, проте декларують наміри рухатися в напрямі глибшої цифрової модернізації. Це є групою із найбільшим трансформаційним потенціалом. Ще 7% підприємств залишаються на низькому рівні цифрової зрілості без планів щодо змін, а 8% характеризуються дуже незначним рівнем диджиталізації, що свідчить про збереження традиційних операційних моделей.

Таким чином, структура диджиталізації закупівель демонструє:

- поляризацію компаній за рівнем цифрової готовності,
- домінування часткових форм диджиталізації, що вказує на перехідний характер трансформації,
- зростаючий попит на сучасні цифрові рішення, включаючи платформи штучного інтелекту, роботизовану обробку даних, інструменти прогнозування та візуалізації ризиків,
- відрив лідерів цифрової трансформації від компаній із традиційною операційною моделлю.

Поглиблена диджиталізація закупівельних процесів формує не лише нову технологічну архітектуру управління ресурсами, а й відкриває простір для якісно іншого рівня відповідальності бізнесу. Цифрові рішення стають ядром трансформації корпоративних закупівель, забезпечуючи прозорість, аналітичність і керованість процесів у реальному часі.

Водночас, диджиталізація виступає ключовим драйвером переходу до моделей сталості, зокрема зеленого переходу, кліматичної нейтральності та ін. (Mietule et al., 2025; Maksymova et al., 2023).

Сталий розвиток сьогодні розглядається не лише як етична вимога або глобальна екологічна амбіція, а як один із найсуттєвіших викликів сучасного економічного порядку. Суть цього виклику полягає у необхідності збалансувати задоволення поточних потреб суспільства та бізнесу зі збереженням можливостей для майбутніх поколінь. Такий баланс передбачає досягнення довгострокової стійкості (екологічної, соціальної та економічної) за умови мінімізації негативного впливу людської діяльності на природні ресурси, суспільні інститути та ринки праці.

У цьому контексті корпоративні закупівлі стають однією з ключових точок впливу на траєкторії сталого розвитку. Саме закупівельні рішення визначають, які матеріали, товари, технології та практики потрапляють у виробничі і споживчі системи. Від вибору постачальників і вимог до них залежить рівень екологічного навантаження, масштаб соціальної відповідальності та якість корпоративного управління в усій ланці створення вартості.

Зростання актуальності екологічних, соціальних і управлінських принципів (ESG) є одним із найпомітніших трендів у розвитку корпоративної політики. Сучасні організації дедалі більшою мірою інтегрують ESG у свою діяльність, визнаючи їх стратегічне значення для довгострокової конкурентоспроможності. Особливо виразною є різниця між великими корпораціями та компаніями середнього масштабу: великі організації значно активніше впроваджують політики ESG, оскільки мають вищий рівень регуляторних зобов'язань, більшу суспільну видимість та складніші ланцюги постачання.

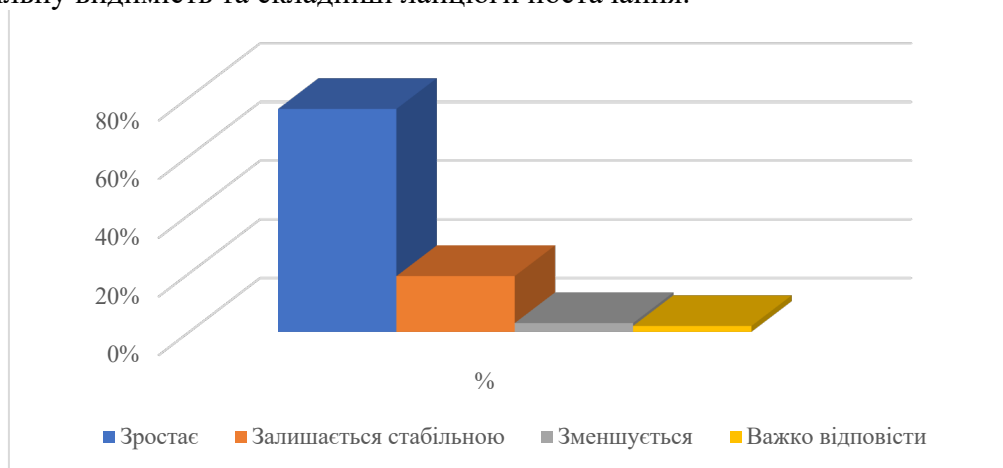


Рисунок 5. Вплив ESG у закупівельних процесах (%)

Джерело: результати опитування 122 компаній (CIPS, 2024)

Представлена структура відповідей свідчить про те, що ESG уже перетворюється на повноцінний стратегічний драйвер розвитку закупівельної функції. Переважна більшість організацій (76%) фіксують зростання ролі ESG, що підтверджує системний перехід від декларативного ставлення до сталого розвитку до його практичної інтеграції у бізнес-процеси. ESG дедалі частіше визначає критерії вибору постачальників, параметри оцінювання витрат, управління ризиками та вимоги до прозорості ланцюгів постачання. Те, що лише 3% компаній повідомляють про зменшення значущості ESG, а 19% про її стабільність, підкреслює незворотність тренду: рух у напрямі стійкості вже не є факультативним, а стає частиною нової норми корпоративного управління. Низький показник невизначеності (2%) свідчить про те, що питання ESG є добре зрозумілим і структурованим у більшості організацій.

Таким чином, ESG у закупівлях розглядається як механізм створення довгострокової цінності, інструмент забезпечення екологічної та соціальної відповідальності бізнесу та важлива передумова конкурентоспроможності в умовах глобальної економічної трансформації.

Характерним є й зростання уваги до етичних аспектів закупівельної діяльності. Більшість організацій декларують дотримання етичної політики, однак реальні практики її

впровадження суттєво варіюють. Там, де система моніторингу відповідності є зрілою, виявляється менше порушень, що підкреслює важливість інституційної зрілості, а не лише формального запровадження політики. Натомість слабка система контролю призводить до зростання кількості етичних ризиків, зниження прозорості та погіршення стійкості ланцюгів постачання.

Важливим висновком є те, що рівень пріоритетності сталого розвитку прямо корелює із внутрішньою якістю корпоративного управління. У тих випадках, коли питання ESG не інтегровані в стратегічну рамку організації, спостерігається відчуження між закупівельною функцією та радою директорів, слабшає комунікаційна взаємодія та знижується прозорість у ланцюгах постачання. І навпаки — ті компанії, які вважають стійкість стратегічною цінністю, демонструють сильніший управлінський потенціал, кращу взаємодію між функціями та ефективніші результати в управлінні ризиками.

Відтак, ESG стає не просто модною концепцією, а системним індикатором зрілості організації, її стратегічної далекоглядності та відповідальності у глобальному економічному середовищі. Компанії, що інтегрують ESG у закупівельну стратегію, не лише зменшують власні ризики, але й формують нові правила гри для ринку, сприяючи переходу до стійких і відповідальних бізнес-моделей.

Висновки (Conclusions)

Глобальний ринок закупівель функціонує в умовах багатовекторної турбулентності, що поєднує геополітичну невизначеність, інфляційний тиск, логістичні збої та дефіцит робочої сили. У такому середовищі закупівельна функція перестає бути операційною та набуває стратегічного виміру управління ризиками й ресурсами. Саме закупівлі забезпечують організаціям здатність адаптивно реагувати на зовнішні шоки, переорієнтовувати ланцюги постачання, контролювати витрати й підтримувати операційну стійкість. Цей контекст зумовлює безпрецедентне зростання їхнього впливу на стратегічне планування і фінансові результати.

Вплив закупівель на витрати є системним і багатовимірним, оскільки закупівлі визначають управління ключовими категоріями витрат: від офісного забезпечення та інфраструктури до професійних послуг, ІТ-рішень, обладнання та енергоресурсів. Найвищий рівень контролю зосереджений у тих сферах, де витрати є постійними та масштабними, що робить закупівлі ключовим інструментом оптимізації бізнес-моделі компанії.

Організаційні структури закупівель поки що не відповідають їхній стратегічній ролі. Незважаючи на зростання впливу, лише незначна частка компаній забезпечує представництво керівника закупівель на рівні ради директорів. Це обмежує можливість своєчасної інтеграції закупівельної аналітики у корпоративне управління та стримує вплив закупівель на стратегічне рішення. Лише 14% організацій демонструють повноцінну інтеграцію закупівель до процесів прийняття рішень, тоді як близько третини компаній характеризуються віддаленим або опосередкованим зв'язком. Така нерівномірність погіршує комунікацію, уповільнює прийняття рішень та послаблює прозорість ланцюгів постачання.

Цифрова трансформація закупівель прискорюється, що підтверджується намірами 35% компаній збільшити інвестиції в штучний інтелект, а 30% у кібербезпеку. Ці дані свідчать про перехід до моделі, за якої цифрові технології забезпечують прогнозованість, прозорість, управління ризиками у складних ланцюгах постачання. Однак, рівень диджиталізації закупівельних процесів нерівномірний та відображає глибокий трансформаційний розрив. Лише 2% компаній досягли повної цифрової інтеграції, тоді як 27% перебувають на шляху до неї, а 26% залишаються на частковому рівні без планів розвитку.

Інвестиційні пріоритети компаній зміщуються у бік забезпечення довгострокової сталості та, водночас, технологічного оновлення. Переважна більшість організацій визначає сталий розвиток (68%) і цифрові технології (63%) як пріоритетні напрями для інвестування, що свідчить про формування нової концепції – так званих «інтелектуальних закупівель», у

межах якої стратегія постачання поєднується з аналітичною підтримкою та ESG-орієнтованістю.

Сталий розвиток та ESG стають фундаментальними критеріями закупівельної діяльності. Для переважної більшості міжнародних компаній питання екологічної, соціальної та управлінської відповідальності є важливими: 76% компаній фіксують зростання важливості ESG, тоді як лише 3% — її зниження. Така динаміка свідчить про незворотність переходу бізнесу до нових моделей управління, у яких екологічні та соціальні критерії стають практично рівнозначними економічним. Водночас, синергія диджиталізації та ESG формує нову парадигму закупівель, оскільки цифрові рішення забезпечують можливість комплексного моніторингу та вимірювання екологічних і соціальних параметрів, тоді як ESG визначає ціннісні та стратегічні рамки. Поєднання цих чинників створює модель закупівель, що є прозорою, керованою даними, стійкою до ризиків і спрямованою на створення довгострокової цінності.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримувало зовнішнього фінансування

Внесок авторів (Authors contribution)

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

Література (References)

- Ascari, G., Bonam, D., & Smadu, A. (2024). Global supply chain pressures, inflation, and implications for monetary policy. *Journal of International Money and Finance*, 142, 103029. <https://doi.org/10.1016/j.jimonfin.2024.103029>
- Bányainé Tóth, Á. (2024). The influence of procurement logistics strategy on organizational hierarchies: Strategic, tactical, and operational perspectives. *ADVANCED LOGISTIC SYSTEMS: THEORY AND PRACTICE*, 18(4), 73-88. URL: <https://doi.org/10.32971/als.2024.039>
- Basiru, J. O., Ejiofor, C. L., Onukwulu, E. C., & Attah, R. U. (2023). Sustainable procurement in multinational corporations: A conceptual framework for aligning business and environmental goals. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 4(1), 774-787. <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2023.4.1.774-787>
- Bogdan, V., Gherai, D. S., Rus, L., & Popa, D. N. (2025, June). From Transparency to Maturity. An Exploratory Exercise to Assess Supply Value Chain ESG Reporting in the Light of ESRS Requirements. In 11th BASIQ International Conference on New Trends in Sustainable Business and Consumption. Oradea, Romania (pp. 26-28). <https://doi.org/10.24818/BASIQ/2025/11/055>
- CIPS [Chartered Institute of Procurement & Supply]. (2024). Global State of Procurement & Supply 2024: A profession in the spotlight. CIPS & GEP.
- Domingos, F. D., Heinrich, C. J., Saussier, S., & Shiva, M. (2025). The interplay of discretion and complexity in public contracting and renegotiations. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 35(2), 148-163. <https://doi.org/10.1093/jopart/muaf004>

- Esan, O. J., Uzozie, O. T., Onaghinor, O., Osho, G. O., & Etukudoh, E. A. (2022). Procurement 4.0: Revolutionizing supplier relationships through blockchain, AI, and automation: A comprehensive framework. *J. Front. Multidiscip. Res*, 3(1), 117-123. <https://doi.org/10.54660/IJFMR.2022.3.1.117-123>
- Gunawan, E., & Mutaqin, M. I. (2024). Strategic Initiatives for Digital Transformation in Inclusive Procurement Ecosystems of UKPBJ Kemenkeu. *Help: Journal of Community Service*, 1(3), 168-186. <https://doi.org/10.62569/hjcs.v1i3.75>
- Huang, S., Zhang, Y., Cheng, T., & Guo, X. (2025). The Influence of Customer ESG Performance on Supplier Green Innovation Efficiency: A Supply Chain Perspective. *Sustainability*, 17(12), 5519. <https://doi.org/10.3390/su17125519>
- Hushko, O., & Shabliy, I. (2025). The impact of digitalization on the efficiency of corporate procurement in the context of sustainable development. *Economic Scope*, (199), 159-167.: <https://doi.org/10.30838/EP.199.159-167>
- Karaman, A. S., Ellili, N. O. D., & Uyar, A. (2024). Do sustainable supply chain practices mitigate carbon emissions? The role of supplier environmental, social and governance training. *Business Strategy and the Environment*, 33(8), 8126-8148. <https://doi.org/10.1002/bse.3931>
- Maksymova, I. I. (2024). The role of digitalization in supporting global ESG initiatives: the transition of international business to climate neutrality. *Investments: practice and experience*, (6), 103-110.: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2024.6.103>
- Maksymova, I., Savelyev, Y., Zvarych, I., Kurylyak, V., Lyzun, M., Sachenko, S., & Lishchynskyy, I. (2023, September). Global differentiation of climate-digital projects in terms of low-carbon economy. In *2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* (Vol. 1, pp. 859-864). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348646>
- Mietule, I., Arbidane, I., Maksymova, I., Kulishov, V., & Amantova-Salmane, L. (2025). Strategic Role of Sustainable Digitalization in Driving the Green Transition. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080238>
- Onukwulu, E. C., Dienagha, I. N., Digitemie, W. N., Egbumokei, P. I., & Oladipo, O. T. (2025). Integrating sustainability into procurement and supply chain processes in the energy sector. *Gulf Journal of Advance Business Research*, 3(1), 76-104.
- Otieno, K., & Odero, J. A. (2023). Supplier Relationship Management Practices Procurement Ethics and Supply Chain Performance in County Governments.
- Pakurár, M., Kun, I. A., Felföldi, J., Vasa, L., & Oláh, J. (2020). Integration of logistics function and business performance. *European Research Studies*, 23, 567-583.
- Roy, M. J., Spiesova, A., Curtin, M., Suchowerska, R., Rendall, J., Strokosch, K., ... & Barraket, J. (2025). Exploring value creation from an ecosystem perspective: A critical examination of social procurement policy. *Public Money & Management*, 45(4), 304-313. <https://doi.org/10.1080/09540962.2024.2355995>
- Silva, A. V. B., & Romaro, P. (2024). Emerging trends in sustainable management: developing managers' skills for ESG challenges. *Revista de Gestão e Secretariado*, 15(6), e3789-e3789. <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i6.3789>
- Wadhwa, J., Colaco, P., Reddy, S., & Jain, M. (2024). Comprehensive literature review on stakeholder prospects, responsibilities, and quality performance measurement in sustainable supply chain governance. *Multidisciplinary Reviews*. <https://10.31893/multirev.2023ss083>
- Wang, X., Wu, H., Shen, Y., & Wang, T. (2025). Towards Sustainable Supply Chains: Evaluating the Role of Supply Chain Diversification in Enhancing Corporate ESG Performance. *Systems*, 13(4), 266. <https://doi.org/10.3390/systems13040266>
- Zope, I., Mhaske, P., & Balkrishna, G. (2025). Reimagining Sourcing and Procurement: Leveraging Digital Transformation for Strategic Value Creation in the Global Supply Chain. *Authorea Preprints*. . <https://doi.org/10.36227/techrxiv.173888058.87362917/v1>



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

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

JEL: D11, D22, D23

DOI: 10.62911/ete.2025.03.02.02

Innovative approaches to managing software companies in the digital economy

Citation:

Vasylchak S., Zhydiak O., & Zeinalov R. (2025). Innovative approaches to managing software companies in the digital economy. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", Vol.3 No.2 (2025), 21–29. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.02>

Svitlana Vasylchak

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

e-mail: vsyl123@i.ua

 *ORCID iD: 0000-0001-9757-1683*

Oleksandra Zhydiak

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

e-mail: gidyak@i.ua

 *ORCID iD: 0000-0002-7667-439X*

Rauf Zeinalov

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

e-mail: zeinalov_re_24700@kneu.dp.ua

 *ORCID iD: 0009-0003-2733-3294*

Abstract: The subject of the study is theoretical and methodological approaches to the formation of innovative models of management of software companies in the digital economy. The purpose of the study is to identify key components of management mechanisms that ensure the efficiency of IT companies, generalize their content, and define the role and tasks in a complex system of digital transformation. The components of the organizational structure of management mechanisms that contribute to the implementation of analytics, flexible methodologies, and adaptation to market changes are studied. The study was conducted using a combination of methods: general methods - generalization, abstraction, system-structural analysis; special methods of economic and statistical analysis, in particular comparative analysis to assess the growth dynamics of the IT sector of Ukraine, as well as content analysis to generalize scientific approaches to management. Based on comparison and analysis methods, the dynamics of the growth of the number of IT specialists and the productivity of companies in Ukraine for the period 2018–2024 were assessed. The components of management mechanisms were structurally defined, covering analytical tools, process automation, investments in human capital and partnerships, including participation in open-source projects and ecosystems with startups and academic institutions. The goals and objectives of these components were characterized, which form the basis for creating an integrated management system for software companies capable of promptly responding to the challenges of the digital economy. It was substantiated that the optimal combination and mutual coordination of structural components: analytics, innovative methodologies, AI, cloud solutions and adaptability to change, allow to form an effective management policy. This ensures the competitiveness of IT companies, contributing to their sustainable development in the context of globalization and technological transformations. The study highlights the features of the Ukrainian IT sector, which demonstrates resilience due to high adaptability and innovative potential, despite wartime challenges and cyber threats. The results of the study can be used to improve the management strategies of IT companies in Ukraine and abroad.

Received: 15/12/2025

Accepted: 19/12/2025



Keywords: software-companies, high-technology management, innovations, digital transformation, analytics, IT-business.

JEL: D11, D22, D23

Innovative approaches to managing software companies in the digital economy

Svitlana Vasylychak

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

e-mail: vsv123@i.ua;

 ORCID ID: 0000-0001-9757-1683

Oleksandra Zhydiak

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

e-mail: gidyak@i.ua;

 ORCID: 0000-0002-7667-439X

Rauf Zeinalov

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

e-mail: zeinalov_re_24700@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0003-2733-3294

Abstract: The subject of the study is theoretical and methodological approaches to the formation of innovative models of management of software companies in the digital economy. The purpose of the study is to identify the key components of management mechanisms that ensure the efficiency of IT companies, generalize their content, determine the role and tasks in the complex system of digital transformation. The components of the organizational structure of management mechanisms that contribute to the implementation of analytics, flexible methodologies and adaptation to market changes are studied. The study was conducted using a set of methods: general methods - generalization, abstraction, system-structural analysis; special methods of economic and statistical analysis, in particular comparative analysis to assess the dynamics of growth of the IT sector of Ukraine, as well as content analysis to generalize scientific approaches to management. The views of scientists on the concept of software company management are summarized, the key role of data analytics (big data, business analytics tools such as Power BI and Tableau), flexible methodologies (Agile, SCRUM, DevOps) and modern technologies (artificial intelligence, cloud solutions) in ensuring competitiveness in the digital economy is identified. Based on comparison and analysis methods, the dynamics of growth in the number of IT specialists and company productivity in Ukraine for the period 2018–2024 are assessed, as well as the impact of martial law on the adaptation of the IT sector. The components of management mechanisms are structurally defined, covering analytical tools for forecasting market trends, process automation through CI/CD, investments in human capital through training programs (upskilling, reskilling) and partnerships, including participation in open-source projects and ecosystems with startups and academic institutions. The goals and objectives of these components are described, which form the basis for creating an integrated management system for software companies capable of responding promptly to the challenges of the digital economy. It is substantiated that the optimal combination and mutual consistency of structural components, such as analytics, innovative methodologies, artificial intelligence technologies, cloud solutions and adaptability to change, allow for the formation of effective management policies. This ensures the competitiveness of IT companies, contributing to their sustainable development in the context of globalization and technological transformations. The study emphasizes the features of the Ukrainian IT sector, which demonstrates resilience due to high adaptability and innovative potential, despite the challenges of wartime, such as staff shortages and cyber threats. The results of the study can be used to improve management strategies for IT companies in Ukraine and abroad.

Keywords: software-companies, high-technology management, innovations, digital transformation, analytics, IT-business

Інноваційні підходи до управління software-компаніями в умовах цифрової економіки

Світлана Васильчак

проф., д.е.н., Державний університет економіки і технологій

м. Кривий Ріг, Україна

e-mail: vsv123@i.ua;

 ORCID ID: 0000-0001-9757-1683

Олександра Жидяк

проф., д.е.н., Державний університет економіки і технологій, Україна

e-mail: gidyak@i.ua;

 ORCID: 0000-0002-7667-439X

Рауф Зейналов

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

e-mail: zeinalov_re_24700@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0003-2733-3294

Анотація: Предметом дослідження є теоретико-методичні підходи до формування інноваційних моделей управління software-компаніями в умовах цифрової економіки. Метою дослідження є виокремлення ключових компонентів управлінських механізмів, що забезпечують ефективність ІТ-компаній, узагальнення їх змісту, визначення ролі та завдань у комплексній системі цифрової трансформації. Досліджено складові організаційної структури механізмів управління, які сприяють впровадженню аналітики, гнучких методологій та адаптації до ринкових змін. Дослідження проведено з використанням сукупності методів: загальні методи – узагальнення, абстрагування, системно-структурний аналіз; спеціальні методи економіко-статистичного аналізу, зокрема порівняльного аналізу для оцінки динаміки зростання ІТ-сектору України, а також контент-аналізу для узагальнення наукових підходів до управління. Узагальнено погляди науковців на поняття управління software-компаніями, визначено ключову роль аналітики даних, гнучких методологій та сучасних технологій у забезпеченні конкурентоспроможності в цифровій економіці. На основі методів порівняння та аналізу оцінено динаміку зростання кількості ІТ-спеціалістів і продуктивності компаній в Україні за період 2018–2024 років, а також вплив воєнного стану на адаптацію ІТ-сектору. Структурно визначено компоненти механізмів управління, що охоплюють аналітичні інструменти для прогнозування ринкових трендів, автоматизацію процесів через CI/CD, інвестиції в людський капітал шляхом програм навчання (upskilling, reskilling) і партнерства, включаючи участь в open-source проєктах та екосистемах зі стартапами й академічними установами. Охарактеризовано цілі та завдання цих компонентів, які формують основу для створення інтегрованої системи управління software-компаніями, здатної оперативно реагувати на виклики цифрової економіки. Обґрунтовано, що оптимальне поєднання та взаємна узгодженість структурних компонентів, таких як аналітика, інноваційні методології, технології штучного інтелекту, хмарні рішення та адаптивність до змін, дозволяють формувати ефективну управлінську політику. Це забезпечує конкурентоспроможність ІТ-компаній, сприяючи їх сталому розвитку в умовах глобалізації та технологічних трансформацій. Дослідження підкреслює особливості українського ІТ-сектору, який демонструє стійкість завдяки високій адаптивності та інноваційному потенціалу, незважаючи на виклики воєнного часу, такі як дефіцит кадрів і кіберзагрози. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення стратегій управління ІТ-компаніями в Україні та за її межами.

Ключові слова: software-компанії, високотехнологічне управління, інновації, цифрова економіка, інноваційні підходи, цифрова трансформація, інструменти бізнес-аналітики, ІТ-бізнес.

Вступ (Introduction)

Цифрова економіка трансформує підходи до управління software-компаніями, вимагаючи від них швидкої адаптації до технологічних змін, конкуренції та потреб ринку. Аналітика, інновації та гнучкість стають ключовими факторами успіху в умовах динамічного середовища. Сучасні IT-компанії використовують передові технології, такі як big data, штучний інтелект та автоматизація, щоб оптимізувати процеси та створювати конкурентоспроможні продукти. Водночас виклики, пов'язані з цифровою трансформацією, потребують нових управлінських стратегій, які поєднують аналітичні інструменти, інноваційні методології та адаптивність до ринкових умов (*Harmash, 2023*).

Управління software-компаніями в цифровій економіці передбачає не лише технічний розвиток, але й створення культури інновацій та гнучкості. Компанії, які успішно застосовують аналітику для прогнозування трендів, впроваджують гнучкі методології, такі як Agile чи DevOps, та інвестують у розвиток талантів, мають більше шансів на успіх. Ця стаття аналізує інноваційні підходи до управління software-компаніями, розглядаючи методи, які сприяють їх ефективності та конкурентоспроможності в умовах цифрової економіки (*Hamdulay, 2022*).

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Дослідження базується на аналізі літератури та практичних кейсів, пов'язаних з управлінням software-компаніями в умовах цифрової економіки. Було використано наукові статті, звіти та аналітичні матеріали, які охоплюють теми аналітики даних, гнучких методологій, цифрової трансформації та управління віддаленими командами (*Lysenko & Makovoz, 2022*). Методологія включає порівняльний аналіз підходів до управління в IT-секторі, зокрема в Україні, та вивчення впливу цифрових технологій на бізнес-процеси. Особлива увага приділялася адаптації компаній до викликів цифрової економіки, включаючи воєнний стан в Україні (*YC Market, 2024*).

Результати (Results)

Аналітика даних є ключовим елементом управління software-компаніями в цифровій економіці. Використання big data та інструментів бізнес-аналітики дозволяє компаніям приймати обґрунтовані рішення, оптимізувати розробку продуктів і прогнозувати ринкові тренди. Наприклад, аналіз поведінки користувачів через A/B-тестування допомагає створювати продукти, які відповідають потребам клієнтів (*YC.Market, 2024*). В Україні IT-компанії активно використовують аналітику для оцінки продуктивності команд, що дозволяє ефективно розподіляти ресурси та підвищувати якість розробки (*Harmash A. O., 2023*). Зокрема, інструменти візуалізації даних, такі як Power BI чи Tableau, допомагають менеджерам виявляти вузькі місця в процесі і оперативно їх усувати (*BIT Impulse, 2024*).

Аналітика також відіграє важливу роль у стратегічному плануванні. Згідно з дослідженням А.Т. Kearney (2019), компанії, які інвестують у аналітичні інструменти, мають на 20% вищу ефективність у порівнянні з конкурентами. У контексті України, де IT-сектор залишається одним із ключових драйверів економіки, аналітика допомагає прогнозувати попит на нові продукти та оптимізувати витрати (Ministry of Economy of Ukraine, 2020). Наприклад, українські компанії, такі як SoftServe, використовують аналітику для оцінки ринкових можливостей і розробки стратегій масштабування.

Гнучкі методології, такі як Agile та SCRUM, стали стандартом в управлінні software-компаніями. Вони дозволяють скоротити час розробки, підвищити якість продуктів і забезпечити гнучкість у відповідь на зміни вимог клієнтів. Згідно з Hamdulay (2022), впровадження SCRUM підвищує продуктивність команд на 15-20% завдяки чіткому розподілу завдань і регулярним ретроспективам. В Україні Agile активно застосовується в умовах

віддаленої роботи, що стало особливо актуальним під час воєнного стану (*Lysenko & Makovoz, 2022*).

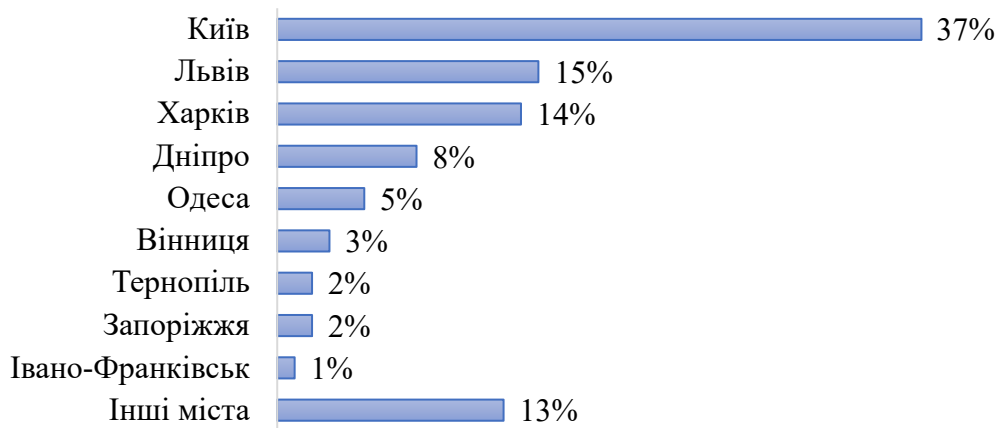


Рисунок 1. Концентрація ІТ-спеціалістів в Україні за містами в 2020 р., %
Джерело: побудовано авторами за (Ministry of Economy of Ukraine, 2020)

Інший важливий аспект — автоматизація процесів. Впровадження CI/CD (Continuous Integration/Continuous Deployment) дозволяє прискорити випуск продуктів і зменшити кількість помилок. Наприклад, компанії, які використовують DevOps, досягають на 30% швидшого виходу продуктів на ринок (*Zeinalov, & Palii, 2025*). Автоматизація також сприяє ефективному управлінню віддаленими командами, що є критично важливим в умовах цифрової економіки, де географічні бар'єри втрачають значення (*Lysenko & Makovoz, 2022*).

Культура інновацій є ще одним важливим елементом. Компанії, які заохочують експерименти та тестування нових ідей, створюють середовище для проривних рішень. Наприклад, Google використовує "20% rule", дозволяючи співробітникам витрачати частину часу на власні проєкти, що призвело до створення таких продуктів, як Gmail. В Україні подібний підхід застосовують компанії на кшталт EPAM, які інвестують у внутрішні хакатони та інноваційні лабораторії (*Harmash., 2023*).

Цифрова економіка вимагає від software-компаній швидкої адаптації до змін. Гнучкість стратегій дозволяє оперативно реагувати на нові технологічні тренди, такі як штучний інтелект чи хмарні обчислення. Наприклад, Microsoft адаптувалася до хмарної ери, інвестуючи в Azure, що дозволило їй залишатися лідером на ринку (*Lysenko & Makovoz, 2022*). В Україні ІТ-компанії адаптуються до викликів воєнного стану, переходячи на гібридні моделі роботи та інвестуючи в кібербезпеку (*Buriak & Makovoz., 2023*).

Інвестиції в людський капітал є ще одним ключовим аспектом. Постійне навчання (upskilling) і перекваліфікація (reskilling) дозволяють співробітникам залишатися конкурентоспроможними в умовах швидких технологічних змін. Згідно з даними Національного інституту стратегічних досліджень (2024), в Україні попит на ІТ-фахівців зростає на 10% щороку, що вимагає від компаній створення програм навчання. Наприклад, українські компанії, такі як GlobalLogic, пропонують внутрішні академії для підвищення кваліфікації розробників.

Партнерства та екосистеми також відіграють важливу роль. Участь у open-source проєктах і співпраця з іншими гравцями ринку сприяють обміну знаннями та інноваціям. Наприклад, українські ІТ-компанії активно співпрацюють із глобальними платформами, такими як GitHub, що дозволяє їм інтегрувати новітні технології у свої продукти. Крім того, створення екосистем, які об'єднують стартапи, великі компанії та академічні установи, сприяє розвитку інновацій в ІТ-секторі.

Незважаючи на переваги цифрової економіки, software-компанії стикаються з низкою викликів. По-перше, це кіберзагрози, які вимагають значних інвестицій у безпеку даних. По-друге, дефіцит кваліфікованих кадрів, особливо в Україні, де багато фахівців мігрують за

кордон (*National Institute for Strategic Studies, 2024*). По-третє, швидкі темпи технологічних змін змушують компанії постійно оновлювати свої стратегії.

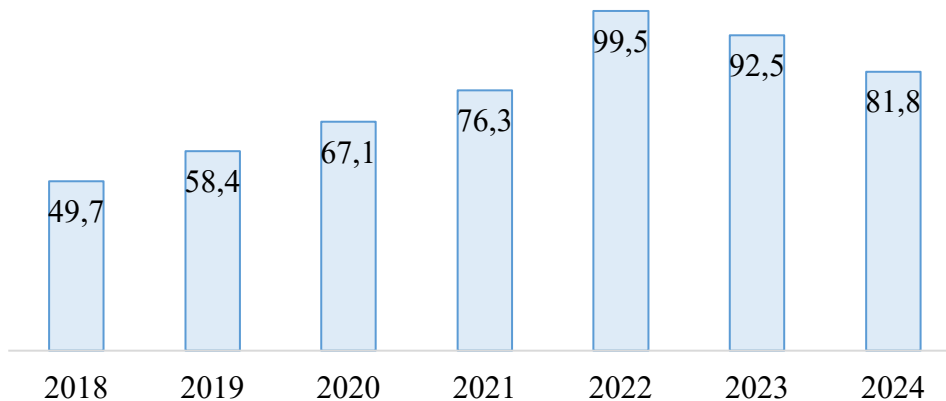


Рисунок 2. Динаміка кількості спеціалістів у 50 найбільших ІТ-компаніях України протягом 2018-2024 рр., тис. осіб*

*Джерело: побудовано авторами за (*National Institute for Strategic Studies, 2024*)

Проте перспективи залишаються оптимістичними. Розвиток штучного інтелекту, хмарних технологій і автоматизації відкриває нові можливості для software-компаній. В Україні ІТ-сектор продовжує зростати, незважаючи на виклики воєнного часу, завдяки високій адаптивності та інноваційному потенціалу (*Buriak. & Makovoz., 2023*). Компанії, які інвестують у аналітику, гнучкі методології та людський капітал, матимуть конкурентну перевагу в цифровій економіці.

Штучний інтелект (ШІ) стає невід'ємною частиною управління software-компаніями, надаючи нові можливості для автоматизації та оптимізації процесів. ШІ-інструменти, такі як машинне навчання та обробка природної мови, дозволяють аналізувати великі обсяги даних у реальному часі, що сприяє швидшому прийняттю рішень. Наприклад, компанії використовують ШІ для прогнозування поведінки клієнтів, оптимізації маркетингових стратегій і навіть автоматизації тестування програмного забезпечення (*YC Market, 2024*). В Україні ІТ-компанії, такі як MacPaw, активно інтегрують ШІ для вдосконалення продуктів і підвищення ефективності внутрішніх процесів (*Harmash, 2023*). ШІ також трансформує управління проєктами. Алгоритми машинного навчання можуть передбачати ризики проєктів, оцінювати терміни виконання завдань і пропонувати оптимальні сценарії розподілу ресурсів. Згідно з дослідженням, компанії, які використовують ШІ в управлінні проєктами, скорочують затримки на 25% і підвищують точність прогнозування витрат (*Lysenko, S. M., Makovoz, O. S., 2022*). В українських реаліях, де ресурси часто обмежені через воєнний стан, ШІ допомагає компаніям досягати більшої ефективності з меншими затратами (*Buriak. & Makovoz, 2023*).

Однак впровадження ШІ супроводжується викликами. По-перше, це потреба в кваліфікованих спеціалістах, які можуть розробляти та підтримувати ШІ-системи. По-друге, етичні питання, пов'язані з використанням ШІ, такі як конфіденційність даних і упередженість алгоритмів, вимагають ретельного регулювання. Українські компанії, такі як Grammarly, які використовують ШІ для обробки текстів, приділяють значну увагу захисту даних користувачів, що є прикладом відповідального підходу ().

Хмарні технології стали основою для масштабування software-компаній у цифровій економіці. Вони забезпечують гнучкість, економію витрат і можливість швидкого розгортання нових продуктів. Платформи, такі як Amazon Web Services (AWS), Google Cloud і Microsoft Azure, дозволяють компаніям зберігати дані, запускати додатки та надавати послуги без значних капітальних інвестицій у власну інфраструктуру. Наприклад, українська компанія Ajax Systems використовує хмарні рішення для забезпечення роботи своїх IoT-продуктів, що

дозволяє їй конкурувати на глобальному ринку (*Harmash., 2023*). Хмарні технології також сприяють співпраці віддалених команд. Інструменти на основі хмар, такі як Google Workspace чи Microsoft Teams, забезпечують синхронізацію роботи розробників, дизайнерів і менеджерів, що особливо важливо в умовах гібридних моделей роботи. Згідно з даними, компанії, які використовують хмарні інструменти для співпраці, підвищують продуктивність команд на 15% (*A.T. Kearney, 2019*). В Україні, де багато ІТ-компаній перейшли на віддалену роботу через воєнний стан, хмарні технології стали критично важливими (*Buriak & Makovoz 2023*).

Ще однією перевагою хмар є їхня роль у кібербезпеці. Хмарні провайдери пропонують вбудовані інструменти захисту, такі як шифрування даних і системи виявлення вторгнень, що дозволяє компаніям зосередитися на розробці продуктів. Однак залежність від хмарних сервісів створює ризики, такі як можливі збої в роботі провайдерів або витоки даних. Українські ІТ-компанії, які працюють із міжнародними клієнтами, приділяють особливу увагу вибору надійних хмарних провайдерів і резервному копіюванню даних (*Zeinalov & Palii., 2025*).

Цифрова економіка сприяла глобалізації ІТ-ринку, де віддалена робота стала нормою. Управління віддаленими командами вимагає нових підходів, які поєднують технології, комунікацію та мотивацію. Інструменти для віддаленої роботи, такі як Jira, Slack і Zoom, дозволяють координувати проєкти в реальному часі, забезпечуючи прозорість і ефективність. В Україні віддалена робота набула особливого значення через воєнний стан, і компанії, такі як Luxoft, успішно адаптувалися до цього формату, використовуючи цифрові платформи для управління (*Lysenko & Makovoz, 2022*).

Ключовим аспектом управління віддаленими командами є підтримка культури довіри та співпраці. Компанії, які регулярно проводять віртуальні ретроспективи, тимбилдинги та опитування співробітників, мають на 30% вищий рівень залученості команд (*Hamdulay, 2022*). В Україні ІТ-компанії впроваджують гнучкі графіки та програми добробуту, щоб підтримувати мотивацію працівників у складних умовах (*National Institute for Strategic Studies, 2024*). Проте віддалена робота має свої виклики, такі як ризик вигорання, зниження комунікації та складність у моніторингу продуктивності. Для їх подолання компанії використовують аналітичні інструменти для відстеження прогресу проєктів і оцінки добробуту співробітників. Наприклад, інструменти на основі ШІ, такі як Microsoft Viva, допомагають аналізувати рівень залученості та надають рекомендації щодо покращення робочого середовища (*YC Market, 2024*).

Стартапи відіграють важливу роль у розвитку ІТ-сектору, пропонуючи нові ідеї та технології, які великі компанії можуть інтегрувати. В Україні стартап-екосистема активно зростає, незважаючи на воєнний стан, завдяки підтримці інкубаторів і венчурних фондів. Наприклад, стартап Petcube, який розробляє IoT-пристрої, демонструє, як інноваційні продукти можуть конкурувати на глобальному ринку (*Harmash, 2023*). Співпраця між стартапами та великими ІТ-компаніями, такими як Sigma Software, сприяє обміну знаннями та створенню нових рішень. Стартапи також стимулюють інновації через конкуренцію. Вони часто експериментують із новими технологіями, такими як блокчейн чи метавсесвіт, змушуючи великі компанії адаптуватися. Згідно з даними, 40% інновацій у ІТ-секторі України походять від стартапів (*Ministry of Economy of Ukraine, 2020*). Для підтримки стартапів необхідні інвестиції в інфраструктуру, доступ до талантів і регуляторна підтримка, що є викликом для України в поточних умовах (*Buriak & Makovoz, 2023*).

Висновки (Conclusions)

Управління software-компаніями в умовах цифрової економіки вимагає комплексного підходу, який поєднує передові аналітичні інструменти, інноваційні методології та гнучкість у відповідь на швидкі зміни ринку. Проведене дослідження показало, що аналітика даних, зокрема використання big data та інструментів бізнес-аналітики, таких як Power BI чи Tableau,

є основою для прийняття обґрунтованих рішень, оптимізації процесів розробки та прогнозування ринкових трендів. Ці інструменти дозволяють ІТ-компаніям, як в Україні, так і глобально, підвищувати ефективність на 20%, як зазначається в дослідженні А.Т. Kearney (2019), та створювати продукти, що відповідають потребам клієнтів.

Гнучкі методології, такі як Agile, SCRUM і DevOps, стали стандартом управління в ІТ-секторі, забезпечуючи скорочення часу розробки на 30% та підвищення продуктивності команд на 15-20%. В Україні ці підходи набули особливого значення в умовах віддаленої роботи та воєнного стану, дозволяючи компаніям, таким як Luxoft чи SoftServe, підтримувати стабільність і конкурентоспроможність. Автоматизація процесів через CI/CD та використання хмарних технологій, таких як AWS чи Azure, забезпечують швидке розгортання продуктів і ефективну співпрацю віддалених команд, що є критично важливим у цифровій економіці.

Штучний інтелект і хмарні технології відкривають нові горизонти для software-компаній, дозволяючи автоматизувати управління проектами, прогнозувати ризики та оптимізувати ресурси. Наприклад, українські компанії, такі як MacPaw і Grammarly, успішно інтегрують ШІ для вдосконалення продуктів і захисту даних, демонструючи відповідальний підхід до технологічних інновацій. Водночас стартапи, такі як Petcube, стимулюють інновації через конкуренцію та співпрацю, сприяючи розвитку екосистем, які об'єднують великі компанії, академічні установи та венчурні фонди.

В Україні ІТ-сектор демонструє надзвичайну стійкість, зростаючи на 10% щороку, незважаючи на виклики воєнного часу. Однак компанії стикаються з проблемами, такими як кіберзагрози, дефіцит кваліфікованих кадрів і швидкі технологічні зміни. Для їх подолання необхідні інвестиції в кібербезпеку, програми навчання (upskilling/reskilling) та створення сприятливого регуляторного середовища. Приклади компаній, таких як GlobalLogic і Ajax Systems, показують, як інвестиції в людський капітал і технології сприяють глобальній конкурентоспроможності.

Перспективи розвитку ІТ-сектору залишаються оптимістичними. Інтеграція штучного інтелекту, хмарних технологій і гнучких методологій створює умови для масштабування бізнесу та створення проривних продуктів. В Україні підтримка стартап-екосистем і співпраця з глобальними платформами, такими як GitHub, відкривають нові можливості для інновацій. Компанії, які поєднують аналітику, інноваційні підходи та адаптивність, матимуть конкурентну перевагу в цифровій економіці, сприяючи не лише економічному зростанню, але й технологічному прогресу на глобальному рівні.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Автори цієї науково-дослідницької статті зробили вагомий внесок у вивчення та аналіз проблематики, пов'язаної з розробкою інноваційних підходів до управління software-компаніями в умовах цифрової економіки. Концептуалізація та методологія дослідження, огляд літератури, актуалізація проблематики та розробка рекомендацій здійснені В.С.; структуризація підходів до визначеної проблематики, включаючи аналітику та гнучкі методології, виконана Ж.О.; аналіз даних, створення візуалізацій, актуалізація та представлення даних проведені З.Р. Усі автори узгодили остаточну версію рукопису для публікації.

Література (References)

- Buriak, M., & Makovoz, O. (2023). Agile Change Management of Ukraine's IT Sector and Value Creation Amidst Conflict. London International Business and Economics Journal, 189-202. URL: <https://londonic.uk/js/index.php/ljbeh/article/view/189/202>.
- Data visualization: why is this important for business analyst. BIT Impulse. 2024. URL: <https://bitimpulse.com/vizualizacziya-danyh-chomu-cze-vazhlyvo-dlya-biznes-analityka>.
- Hamdulay, N. A. (2022). SCRUM Methodology Adoption Benefits for Employees and IT Organization. NCRD's Business Review: e-Journal, 7(1). URL: <http://www.ncrdsims.edu.in/ckfinder/userfiles/files/03.pdf>.
- Harmash, A. O. (2023). Management of IT Companies' Development in Ukraine and Globally. Modern Engineering and Innovative Technologies, 26(2), 61-72. DOI: 10.30890/2567-5273.2023-26-02-013. URL: <http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit26-02-013>.
- Kearney A.T. (2019). The 2019 A.T. Kearney Global Service Location Index. URL: <https://www.kearney.com/>.
- Lysenko, S. M., & Makovoz, O. S. (2022). Analysis of Modern Trends in Managing Remote IT Teams. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/29951bcd-4447-4aa1-884e-c95223ecde61/content>.
- Ministry of Economy of Ukraine. (2020). Ukraine's Information Technologies Sector. URL: <https://me.gov.ua/view/90c9df11-b6ca-48f1-a823-4c326eb6719a>.
- National Institute for Strategic Studies. (2024). Employment in the IT Segment of Ukraine's Labor Market. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/sotsialna-polityka/zaynyatist-v-it-sehmenty-rynku-pratsi-ukrayiny>.
- YC.Market. (2024). Why Data Analytics is Key to Success in Modern Business? YC.Market Blog. URL: <https://blog.youcontrol.market/chomu-analitika-danikh-ie-kliuchovoiu-dlia-uspikhu-v-suchasnomu-biznisi>.
- Zeinalov, R. E., Palii, N. R. (2025). High-tech management of software companies: analytics, innovation and adaptation. Zenodo. URL: <https://zenodo.org/records/15109163>.



JEL: F50, F22, O15, J61

DOI: 10.62911/ete.2025.03.02.03

The global cryptocurrency market: empirical evidence and reflections on the green transition

Citation:

Maksymova I., Yegorova I., & Kulishov V. (2025). The global cryptocurrency market: empirical evidence and reflections on the green transition. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", Vol. 3 No. 2 (2025), 30-42 <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.03>

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

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

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 presents an empirical study of the global cryptocurrency market in the context of its evolution under the influence of macroeconomic, technological and geopolitical factors, as well as the broader framework of the global green transition. By analyzing market dynamics across several critical periods, including the pre COVID crisis phase, the COVID 19 pandemic, the full scale russian invasion of Ukraine and the most recent stage of partial recovery, the study characterises the structural features of cryptocurrency volatility in comparison with traditional financial instruments, particularly the S&P 500 and USDX indices. The empirical component of the methodology is based on open access datasets from CoinMarketCap, TradingView and Investing, which enables a comparative assessment of cryptocurrency trends and stock market movements. The findings demonstrate that cryptocurrency markets remain highly sensitive to news flows, regulatory decisions and speculative activity by large investors, which complicates the application of conventional fundamental analysis methods. Special attention is devoted to the environmental dimension of crypto industry development. The high energy consumption of Bitcoin is identified as a major barrier to integrating blockchain technologies into sustainability oriented economic frameworks. The study also examines the potential of environmentally oriented tokens, most notably the Energy Web Token, which is positioned as a tool for supporting decarbonization processes in energy markets but continues to exhibit weak price performance and limited investor demand in comparison with green energy indices. The comparative analysis reveals a substantial gap between the conceptual value of green tokens and their actual market perception. Overall, the results confirm that despite the continuing expansion of the emergence of new technological solutions, the integration of crypto assets into the green transition remains fragmented. Meaningful advancement in this direction requires clearer regulatory frameworks, technological improvements and stronger alignment between blockchain applications and measurable environmental outcomes.

Keywords: cryptocurrencies, global financial market, blockchain, green transition, sustainable development, Bitcoin energy consumption, green token, decarbonization, EWT, S&P 500, USDX



Received: 10/12/2025

Accepted: 16/12/2025

JEL: F50, F22, O15, J61

The global cryptocurrency market: empirical evidence and reflections on the green transition

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

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

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 presents an empirical study of the global cryptocurrency market in the context of its evolution under the influence of macroeconomic, technological and geopolitical factors, as well as the broader framework of the global green transition. By analyzing market dynamics across several critical periods, including the pre COVID crisis phase, the COVID 19 pandemic, the full scale russian invasion of Ukraine and the most recent stage of partial recovery, the study characterizes the structural features of cryptocurrency volatility in comparison with traditional financial instruments, particularly the S&P 500 and USDX indices. The empirical component of the methodology is based on open access datasets from CoinMarketCap, TradingView and Investing.com, which enables a comparative assessment of cryptocurrency trends and stock market movements. The findings demonstrate that cryptocurrency markets remain highly sensitive to news flows, regulatory decisions and speculative activity by large investors, which complicates the application of conventional fundamental analysis methods. Special attention is devoted to the environmental dimension of crypto industry development. The high energy consumption of Bitcoin is identified as a major barrier to integrating blockchain technologies into sustainability oriented economic frameworks. The study also examines the potential of environmentally oriented tokens, most notably the Energy Web Token, which is positioned as a tool for supporting decarbonization processes in energy markets but continues to exhibit weak price performance and limited investor demand in comparison with green energy indices. The comparative analysis reveals a substantial gap between the conceptual value of green tokens and their actual market perception. Overall, the results confirm that despite the continuing expansion of the emergence of new technological solutions, the integration of cryptoassets into the green transition remains fragmented. Meaningful advancement in this direction requires clearer regulatory frameworks, technological improvements and stronger alignment between blockchain applications and measurable environmental outcomes.

Keywords: cryptocurrencies, global financial market, blockchain, green transition, sustainable development, Bitcoin energy consumption, green tokens, decarbonization, EWT, S&P 500, USDX

Introduction

The rapid digital transformation of the global economy has become a defining force reshaping international economic relations and accelerating the development of cryptocurrency markets. As digital assets increasingly influence global financial flows, the architecture of transnational investment, international trade, payment systems, and monetary policy, they have emerged not only as innovative financial instruments but also as integral components of a new phase in the evolution

of the world economic order. The relevance of studying the global cryptocurrency market is driven by several key considerations. First, the cryptocurrency sector continues to exhibit rapid growth, exerting a profound impact on the restructuring of the international financial system. Major global financial institutions now devote substantial attention to the regulatory implications of digital assets, highlighting the need for coherent governance frameworks. Second, the expanding ecosystem of cryptoassets has gained particular significance in the context of sustainable development. Concerns about the energy consumption of mining, the search for environmentally efficient alternatives, and the potential of blockchain solutions to enhance transparency and traceability in global supply chains have brought the intersection of cryptocurrency markets and green transitions to the forefront of scholarly debate. Third, geopolitical upheavals have introduced new dimensions to the study of cryptocurrency markets: digital assets have become instruments for mobilising international assistance, alternatives to traditional payment channels, and elements of digital resilience strategies in conditions of military conflict, sanctions pressure, and financial fragmentation.

Given these dynamics, analysing the structural and behavioural features of the global cryptocurrency market acquires not only financial and economic but also international strategic significance. Cryptocurrencies today shape patterns of global competition, influence regulatory trajectories, alter energy consumption profiles, and contribute to the institutional design of the emerging digital economy.

In 2024–2025, the global cryptocurrency market demonstrated both structural maturation and increasing alignment with sustainability goals. Empirical data indicate that the total market capitalization of digital assets fluctuated around USD 2.6–3 trillion by mid-2025, with Bitcoin and Ethereum maintaining a dominant 65% market share. However, recent analyses underscore a significant diversification toward energy-efficient “green” cryptocurrencies and stablecoins designed to mitigate volatility and environmental impact (*Koentzopoulos et al., 2025*).

The comparative study of traditional and environmentally optimized cryptocurrencies reveals that several tokens (such as Cardano, Ripple, and Stellar) demonstrate short-term market efficiency and reduced energy intensity due to the adoption of Proof-of-Stake or hybrid consensus algorithms (Marques & Dias, 2025). This shift coincides with the forecasted post-halving stabilization of Bitcoin’s price trajectory in 2025, which continues to act as a barometer for investor sentiment and long-term sustainability prospects (*Fabuš et al., 2024*).

From an environmental perspective, recent assessments reveal that cryptocurrency mining remains a considerable source of carbon emissions, however with emerging signs of decarbonization through renewable integration and algorithmic optimization. Such mining is responsible for an estimated 0.25% of global CO₂ output and 0.5% of total electricity consumption (Laimon & Almadadha, 2025). The transition toward renewable-powered mining operations in North America and Scandinavia, alongside the increasing use of solar and wind curtailment, has begun to reduce the average carbon intensity of major blockchain networks by approximately 30% since 2022 (Winotoatmojo et al., 2024). Moreover, AI-enhanced blockchain infrastructures (such as those implemented in Render Network and Ocean Protocol) are projected to achieve up to 35% energy savings compared to traditional Proof-of-Work systems by leveraging adaptive learning for transaction optimization (*Kovács & Fűrész, 2025*).

Collectively, empirical data from 2024–2025 suggest that the cryptocurrency market is undergoing a structural transition toward a more resilient and environmentally responsible system. The convergence of AI, stablecoin governance, and renewable-powered mining indicates that the next phase of digital asset evolution may align more closely with global green transition objectives.

Thus, a review of scientific and analytical literature indicates that cryptocurrencies are examined through multiple research lenses, including the economic analysis of digital assets, regulatory policy, cross-border financial integration, and the macroeconomic effects of digital currencies. However, key questions remain insufficiently addressed, particularly those related to the scenario-based development of cryptocurrency markets under conditions of geopolitical turbulence, sustainability commitments, and the accelerating green transition. These gaps underscore the need for further empirical investigation and theoretical reflection within this rapidly evolving field.

Materials and Methods

The methodological framework of the study is based on a combination of quantitative and qualitative approaches aimed at analyzing the dynamics of the global cryptocurrency market and its interaction with traditional financial instruments and indicators of the green transition.

The empirical component of the methodology is grounded in the use of open-access data from three analytical platforms: CoinMarketCap (2025), TradingView (2025) and Investing.com (2025). Data from CoinMarketCap were used to analyse changes in the market capitalisation of major cryptocurrencies and the structure of digital asset dominance. TradingView was employed to construct comparative charts of green energy indices and to conduct a visual assessment of the volatility of Bitcoin and other assets across different time intervals. Data from Investing.com enabled the analysis of traditional financial indicators, including the dynamics of the S&P 500 and USDXX indices, thereby facilitating a meaningful comparison between the cryptocurrency market and the stock and currency segments of the global financial system.

The study applies methods of comparative analysis, structural and dynamic analysis to identify relationships between market indicators and macroeconomic variables. Contextual analysis of the information environment was also used to evaluate the impact of news events and regulatory interventions on short-term cryptocurrency fluctuations.

To assess the environmental dimension of the cryptocurrency industry, a comparative approach was used to interpret the market behaviour of green energy indices and environmentally oriented tokens. This made it possible to identify disparities between the tangible influence of the energy sector and the conceptual positioning of “green” cryptocurrencies.

The methodological logic of the research follows a sequential progression from macro-level trends to structural market characteristics and culminates in the interpretation of empirical results within the broader context of sustainable development and the global green transition. This approach ensures the comprehensiveness and validity of the conclusions obtained.

Results

1. Overall Market Dynamics, Volatility Patterns and Macroeconomic Drivers in the Global Cryptocurrency Ecosystem

The empirical evidence collected for this study demonstrates that the global cryptocurrency market is characterized by pronounced structural sensitivity to macroeconomic shocks, technological shifts, regulatory interventions, and geopolitical disruptions. These forces shape volatility patterns, liquidity cycles, investor sentiment, and the broader integration of digital assets into the international financial system. For a comprehensive understanding of cryptocurrency market dynamics, it is analytically appropriate to situate the empirical assessment within distinct historical and geopolitical phases. Each phase reflects a unique configuration of risks, behavioral responses, and institutional adaptations, which together illuminate the nonlinear evolution of the global digital asset ecosystem.

In this regard, the trajectory of the global cryptocurrency market can be meaningfully examined through four interrelated temporal dimensions: the pre-COVID expansion period, the global COVID-19 crisis, the Russia–Ukraine war as a geopolitical shock, and the approximation of future market dynamics in the context of the green transition and digital financial transformation (Table 1).

Following this periodization, the empirical dynamics of the global cryptocurrency market reveal a pronounced pattern of nonlinear expansion, punctuated by volatility shocks and structural adjustments. According to CoinMarketCap, global cryptocurrency capitalization has exhibited extraordinary fluctuations over the past decade (*CoinMarketCap, 2025*).

While total market capitalisation amounted to approximately USD 15 billion in early 2017, it expanded to nearly USD 600 billion by the end of 2020 and surged to an all-time peak of almost USD 3 trillion in November 2021. The subsequent correction, however, illustrates the intrinsic instability of the sector: by December 2022, amid tightening monetary policy and geopolitical uncertainty, capitalisation had fallen to roughly USD 900 billion. More recent data underscore a partial recovery.

As of June 2025, the global market capitalisation of cryptocurrencies fluctuates around USD 2.3 trillion, driven by renewed institutional interest, the growth of tokenised financial products, and the increasing integration of energy-efficient blockchain consensus models. This pattern confirms not only the cyclical nature of the market but also its high sensitivity to macroeconomic signals and geopolitical disruptions.

Table 1. Analytical justification for the periodisation of global cryptocurrency market dynamics

Analytical Phase	Core Characteristics of the Period	Relevance to Cryptocurrency Market Dynamics
1. Pre-COVID Expansion (2016–2019)	Rapid technological scaling; institutional entry; growing retail adoption; emergence of DeFi; early regulatory debates.	Stable upward trend in market capitalisation; increasing liquidity; strengthening correlation with global equity indices; early manifestations of high-frequency volatility.
2. Global COVID-19 Crisis (2020–2021)	Macroeconomic uncertainty; monetary easing; fiscal stimulus; global digitalisation surge; supply chain disruptions.	Sharp volatility spikes; record inflows into digital assets as “alternative” stores of value; accelerated innovation in blockchain applications and stablecoins; increased systemic visibility of Bitcoin and Ethereum.
3. Russia–Ukraine War (from 2022)	Geopolitical fragmentation; financial sanctions; currency instability; digital resilience strategies; rising defence-related cyber risks.	Cryptocurrencies used for cross-border donations and emergency liquidity; shifts in global risk appetite; renewed regulatory scrutiny; heightened short-term volatility in BTC and major altcoins.
4. Approximation of Future Dynamics (2025–2030, projected)	Institutionalisation of digital finance; green transition policies; carbon pricing; development of energy-efficient consensus mechanisms; AI–blockchain convergence.	Expectations of market maturation; potential stabilisation of volatility; transition from Proof-of-Work to energy-efficient protocols; expansion of tokenised assets and ESG-aligned crypto projects.

Source: the authors’ arrangement

Understanding these dynamics requires situating cryptocurrency behaviour within major global events that have shaped investor expectations and market liquidity. Three turning points stand out:

1. The 2008 global financial crisis, which catalysed interest in decentralised alternatives to traditional financial systems;
2. The COVID-19 pandemic, during which unprecedented monetary easing and digitalisation waves fuelled a surge in crypto adoption;
3. The Russian–Ukrainian war, beginning in 2022, which reinforced the strategic use of cryptocurrencies for cross-border transactions, humanitarian aid mobilisation, and as a hedge against financial restrictions (*Chen & Murtazashvili, 2023; Volosovych et al., 2024*).

Together, these shocks illuminate the structural drivers behind the empirical volatility patterns observed in the crypto ecosystem and provide the foundation for interpreting current and future trajectories in the context of global financial transformation and the green transition.

Such volatility is even more apparent when cryptocurrency performance is compared with traditional financial indices. The S&P 500, representing the 500 largest U.S. corporations, experienced considerable turbulence during the pandemic and subsequent geopolitical shocks, yet its amplitude of fluctuation remained significantly lower than that of Bitcoin. Similarly, the U.S. Dollar Index (DXY), which captures the relative strength of the dollar against six major world currencies, shows variations that are comparatively modest when contrasted with the dramatic price swings characteristic of leading digital assets (*Borzenko et al., 2025*). This divergence signals the distinct behavioural regime of the crypto market, where sentiment, liquidity cycles, speculative pressures, and technological triggers generate disproportionately sharp reactions.

The periodised analytical framework outlined above is further illustrated by the empirical behaviour of major global financial indices and the cryptocurrency market during 2021–2025. Figure 1 presents the dynamic of the S&P 500 index, which offers a useful benchmark for comparing the volatility of digital assets with that of traditional financial instruments.



Figure 1. Dynamics of the S&P 500 Index, 2021–2025 (USD)

Source: compiled from digital dashboard Investing.com (2025)

The S&P 500 trajectory clearly reflects market sensitivity to key global shocks. Although the 2008 financial crisis remains the most dramatic historical downturn (the index lost nearly 900 points) recent disruptions demonstrate analogous volatility mechanisms. During the peak of the COVID-19 pandemic in early 2020, the index dropped by approximately 400 points, driven by unprecedented uncertainty, global lockdowns, and liquidity withdrawals. Subsequent quantitative easing policies facilitated an accelerated rebound, pushing the index to new highs throughout 2021.

A new wave of turbulence emerged in February 2022 with the onset of Russia's full-scale invasion of Ukraine, generating sharp risk-off reactions in global markets. The S&P 500 experienced another significant correction; however, volatility patterns differed in nature, displaying shorter recovery cycles and a more adaptive investor response. By mid-2024 the index resumed a strong upward trajectory, reaching approximately 5,900 points in early 2025, indicating structural resilience despite geopolitical fragmentation.

The USD index, which captures the relative strength of the US dollar against a basket of six major world currencies (EUR, JPY, GBP, CAD, SEK, CHF), serves as a proxy for global risk sentiment and monetary tightening expectations.

Between 2021 and late 2022, USD strengthened notably reflecting aggressive interest-rate hikes by the Federal Reserve and heightened safe-haven demand (peaking was near 26.3 points). In contrast, 2024–2025 demonstrates a stabilisation phase, with the index fluctuating around 25.6–25.8, signalling a softening of monetary conditions and gradual normalisation of global financial flows. These dynamics are important for understanding cryptocurrency markets, as periods of USD strength tend to correlate with reduced crypto-asset liquidity due to capital reallocation into lower-risk instruments.

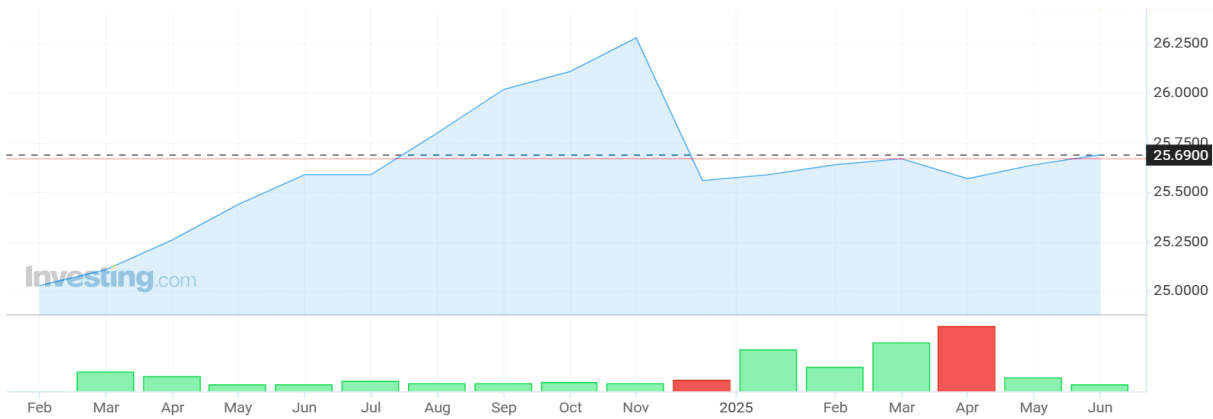


Figure 2. Dynamics of the USDX Index, 2021–2025 (USD)

Source: compiled from digital dashboard Investing.com (2025)



Figure 3. Bitcoin Price Volatility, 2021–2025 (USD)

Source: compiled from digital dashboard Investing.com (2025)

Bitcoin's behavior over the analyzed period markedly diverges from traditional financial indices. While the S&P 500 and USDX exhibit cyclical but relatively contained movements, Bitcoin demonstrates extreme amplitude fluctuations, reinforcing the argument that cryptocurrency markets operate within a distinct volatility regime.

From 2021 to mid-2022 Bitcoin oscillated between USD 30,000 and 65,000, reflecting speculative capital inflows, intensified retail participation, and exuberant expectations around institutional adoption. The collapse of several crypto-lending platforms and macro tightening pushed Bitcoin below USD 20,000 by late 2022. However, the recovery trend in 2024–2025 appears substantially stronger than after previous downturns. By early 2025, Bitcoin approached the USD 105,000 mark, largely driven by:

- increased institutional accumulation,
- expansion of exchange-traded digital asset products,
- the shift toward energy-efficient consensus mechanisms,
- broader integration of blockchain infrastructure across financial and industrial sectors.

These patterns highlight the core paradox of cryptocurrency markets – heightened volatility coexists with long-term upward structural momentum.

The comparative dynamics of the three indicators reveal several empirically grounded insights:

1. Cryptocurrency markets exhibit significantly higher volatility than equity or foreign-exchange markets. This volatility is amplified by speculative behavior, liquidity fragmentation, leverage cycles, and the influence of large holders. Macroeconomic and geopolitical shocks disproportionately affect digital assets (*Pysmennyi, 2023*). For instance, the 2020–2021 monetary expansion fueled extreme upward movements, the 2022 Russia–Ukraine war arose geopolitical shock,

that triggered abrupt corrections.

2. Media narratives and digital information flows intensify price dynamics. Viral messages such as “if you had invested in Bitcoin in 2010, you would be a millionaire now” reinforced speculative demand and broadened market participation (*Huynh, 2022*).

3. Liquidity is improving over time, supported by rising transaction volumes and wider exchange platforms, indicating a maturing market ecosystem. However, such environment remain fragile (*Corobană, 2023*).

4. Investor motivations increasingly combine financial and technological considerations, as blockchain expands beyond speculative use into real-sector applications, including energy management and decarbonisation solutions.

In the context of cryptocurrency markets, the application of fundamental analysis encounters several structural limitations and methodological challenges. One of the core distinctions between digital asset markets and traditional financial systems lies in the absence of a systematised and predictable news environment (*Prates & Fonseca, 2024; Vlahavas & Vakali, 2024*). Unlike conventional markets, where news events are typically anchored in scheduled macroeconomic releases the information flow in cryptocurrency markets is fragmented, irregular, and often highly unpredictable. This fact is extremely relevant for GDP updates, inflation reports, labour market statistics, crude oil inventory data, or decisions on central bank policy rates.

This spontaneity severely complicates medium- and long-term forecasting of market trends. The challenge is further exacerbated by the relatively low degree of regulatory standardisation, which limits the development of a stable analytical environment for evaluating cryptoassets. Additionally, the partial detachment of cryptocurrencies from traditional financial market fundamentals reduces the applicability and efficiency of classical analytical approaches.

Despite these constraints, the evaluation of fundamental factors remains an essential component of investment decision-making within the cryptocurrency ecosystem. Relevant indicators include blockchain technical specifications, development activity, token use cases, network decentralisation, strategic partnerships, trading volumes, and regulatory signals. Systematic examination of these parameters enables the formation of more grounded expectations concerning the long-term potential of specific digital assets, even in an environment characterised by structural uncertainty and rapid technological change.

To complement the empirical assessment of market dynamics, it is essential to identify the cryptocurrencies that demonstrate the strongest growth potential in terms of market capitalisation. Table 2 presents a selection of digital assets that, according to aggregated market data and growth projections for 2025–2026, exhibit the most notable upward momentum and investor interest.

Table 2. Top-performing cryptocurrencies for 2025–2026 by market capitalization growth

Rank	Cryptocurrency	Annual Market Capitalisation Growth (2025)*	Projected Growth (2026)**	Key Drivers of Attractiveness
1	Bitcoin (BTC)	38.5%	22–27%	Institutional accumulation, ETF expansion, store-of-value narrative
2	Ethereum (ETH)	32.1%	18–25%	PoS scalability, DeFi and tokenisation infrastructure
3	Solana (SOL)	68.4%	30–40%	High throughput, growing developer ecosystem
4	Avalanche (AVAX)	41.7%	20–28%	Subnet architecture, enterprise integration
5	Toncoin (TON)	52.9%	25–35%	Integration in Web3 apps and messaging ecosystems
6	Chainlink (LINK)	29.6%	18–22%	Expansion of real-world asset (RWA) oracles

7	Polygon (MATIC)	24.3%	15–20%	Scaling solutions for Ethereum, enterprise partnerships
8	Internet Computer (ICP)	44.2%	22–30%	Decentralised cloud computing model
9	Binance Coin (BNB)	21.8%	12–18%	Strong ecosystem utility and liquidity
10	Optimism (OP)	47.5%	28–38%	Layer-2 adoption, rollup technology expansion

Source: authors' arrangement

* Annual Growth compiled from Investing.com (2025)

** Projected Growth is delivered by CoinMarketCap (2025)

Beyond the assets listed in Table 2, growing investor attention is increasingly directed toward cryptocurrencies that reflect the broader trends of the global green transition (Dziubliuk et al., 2025). Such sustainability-oriented tokens represent an emerging niche within the digital asset ecosystem. It is designed to incentivise renewable energy adoption, facilitate carbon credit markets, or support decentralised energy infrastructure. Although still characterised by high volatility and limited liquidity, such tokens align with long-term structural shifts in environmental policy, corporate decarbonisation strategies, and ESG investment frameworks. As regulatory landscapes evolve and climate-related financial disclosures gain prominence, the strategic relevance of “green cryptoassets” is expected to intensify.

2. Development of the Cryptocurrency Market in the Context of the Global Green Transition

The exceptionally high level of energy consumption required to sustain the world's largest cryptocurrency, Bitcoin remains one of the most critical technical and environmental challenges associated with conventional blockchain systems. Annual Bitcoin electricity consumption exceeds that of entire national economies such as the United Arab Emirates, underscoring a structural contradiction between energy-intensive Proof-of-Work mining and global decarbonization goals (Hakimi et al., 2024; Wendi et al., 2023). This challenge complicates large-scale deployment of blockchain solutions across industries, as energy requirements act as a significant barrier to sustainable adoption (Jones et al., 2022).

In response, developers and industry analysts have increasingly focused on designing blockchain architectures aligned with environmental and climate objectives. One of the most prominent initiatives in this domain is the Energy Web Token (EWT). This cryptocurrency was created to support decarbonisation processes in the energy sector by integrating blockchain technology with energy resource management. The token is central to the Energy Web Chain ecosystem, which aims to accelerate the transition to low-carbon energy systems (Figure 4).

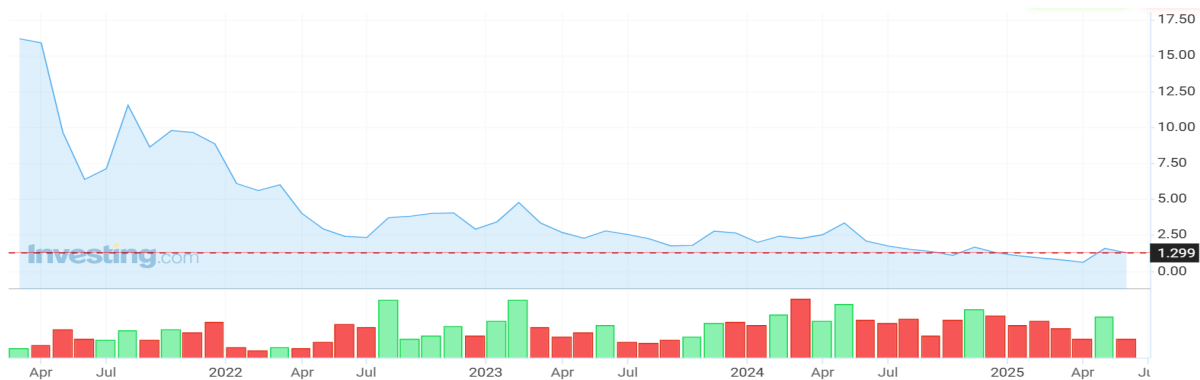


Figure 4. Dynamics of the Energy Web Token (EWT), 2022–2025 (USD)

Source: compiled from digital dashboard Investing.com (2025)

EWT performs three primary functions within the Energy Web Chain ecosystem (Vaccargiu et al., 2023):

First, EWT is used for all transaction fee payments. Since gas fees are not fixed, users can determine their own priority and cost depending on network load.

Second, EWT serves as the reward for validators responsible for block creation. With blocks generated approximately every five seconds, each of the around 40 validators produces a block roughly every two minutes. The standard reward per block is 0.8547 EWT (aprox. USD 3.20), which is significantly lower than Bitcoin's incentive of 6.25 BTC (over USD 120,000 at current prices). Importantly, Energy Web validators are primarily medium and large energy-sector companies participating for environmental and technological reasons rather than short-term financial gain.

Third, staking functionality is currently being rolled out. Two channels are being developed: relay Chain within the future Polkadot-based Energy Web Consortia ecosystem; Energy-sector DeFi platforms, such as ENGIE, offering an estimated APY of around 10% to EWT holders.

To improve interoperability, the Energy Web Foundation has also issued an ERC-20 compatible token, EWTB, allowing holders to bridge assets to Ethereum-based applications (Marin et al., 2023).

The broader context of the global energy transition highlights notable differences between the behaviour of real-sector clean-energy indices and sustainability-oriented cryptocurrencies. Figure 5 shows the dynamics of four major indices over the past year:

- MVIS® Global Low Carbon Energy Price Index (+8.93%)
- BlueStar® Global GreenTech Price Index (+8.15%)
- BlueStar® Wind Energy Industry Price Index (−2.66%)
- BlueStar® Solar Energy Industry Price Index (−29.77%)

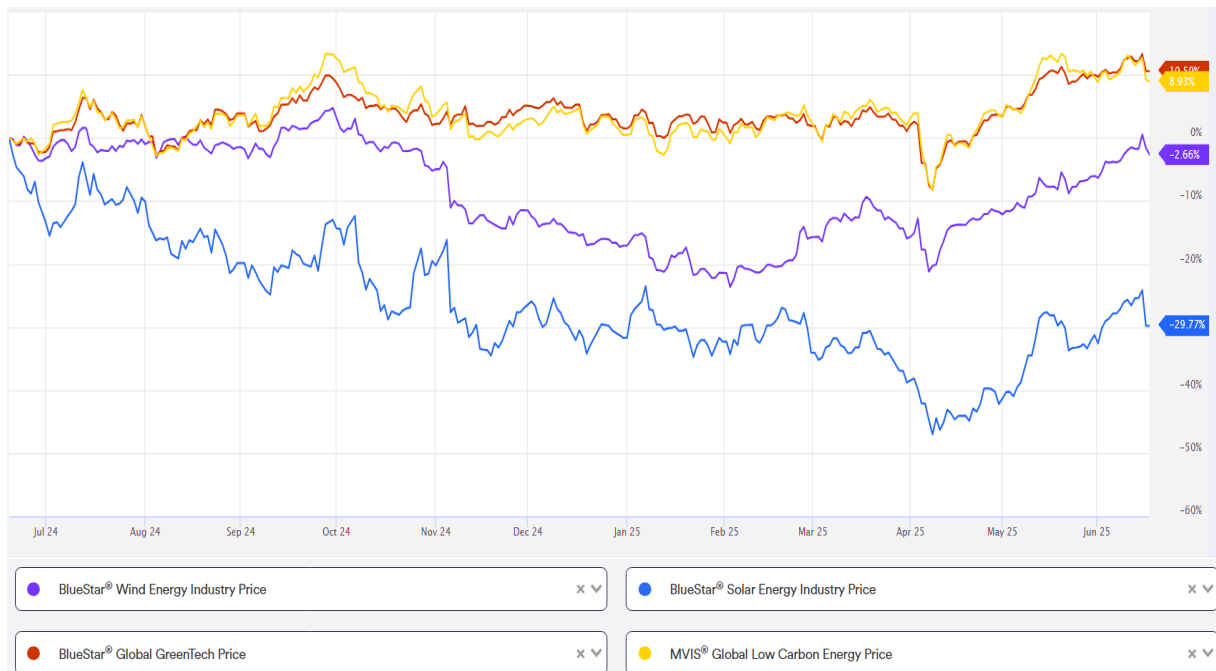


Figure 5. Dynamics of Green Energy Indices, 2024–2025

Source: compiled from digital dashboard TradingView (2025)

Low-carbon energy and broad green technology indices show positive growth, driven by rising institutional interest and increasing investment in companies implementing ESG strategies. In contrast, the solar sector's significant decline (about 30%) reflects supply-chain disruptions, competitive pressure, and changing regulatory frameworks (Lukashevych, 2024).

Meanwhile, Energy Web Token demonstrates a prolonged downward trend. From peak values above USD 15 in 2021, EWT declined to approximately USD 1.30 in June 2025, with no sustained recovery signals. This divergence highlights a weak investor appetite for niche ESG-themed cryptocurrencies, despite their conceptual alignment with decarbonization objectives.

Table 3. Comparative Analysis of Green Energy Indices and the Energy Web Token (EWT)

Criterion	Green Energy Indices (ESG Sector)	Energy Web Token (Cryptocurrency)
Overall Trend	Predominantly upward, moderate growth	Declining since 2021, unstable dynamics
Investor Interest	Increasing, especially among institutional investors	Limited, weak market demand
Volatility	Low to moderate	High, typical for cryptoassets
Market Positioning	Real businesses with state support and revenue streams	Conceptual platform requiring broader market realisation
Integration into Decarbonisation Processes	Direct, embedded in energy systems	Indirect, with limited real-sector influence
Financial Stability	High, supported by predictable cash flows	Low, due to absence of stable income
Perceived Risk	Low	High

The comparative analysis reveals that traditional sustainable financial instruments (such as wind, solar, and low-carbon energy indices) demonstrate higher stability, predictability, and investor confidence than specialised environmentally-oriented cryptocurrencies. The empirical evidence suggests that investors currently favour proven business models with measurable environmental impact (*Maksymova & Nastase, 2024*), whereas ESG-themed cryptoassets remain marginal within the sustainability investment landscape.

Despite the theoretical potential of tokens such as EWT to support decentralised energy markets, the lack of strong market demand, limited real-sector integration, and high volatility significantly constrain their adoption. As a result, digital sustainability tokens have not yet achieved meaningful correlation with broader decarbonisation trends.

This indicates a clear structural divide: real-sector green finance is advancing, whereas green-oriented cryptocurrencies remain experimental, awaiting either technological breakthroughs or regulatory frameworks that could support their mainstream integration.

Conclusions

The global cryptocurrency market demonstrates a nonlinear trajectory shaped by macroeconomic shocks, technological innovation, and geopolitical disruptions, including the COVID-19 crisis, monetary tightening cycles, and the Russia–Ukraine war, each of which triggered significant volatility and shifts in investor sentiment. Market capitalisation dynamics confirm both extreme volatility and long-term structural expansion: from USD 15 billion in 2017 to nearly USD 3 trillion in 2021, followed by a correction to USD 900 billion in 2022 and a partial recovery to around USD 2.3 trillion by mid-2025. These fluctuations reflect heightened sensitivity to liquidity cycles, regulatory expectations, and global risk perception.

Cryptocurrencies exhibit significantly higher volatility compared with traditional financial instruments such as the S&P 500 and USDX, driven by speculative behaviour, fragmented liquidity, media influence, and the actions of large holders (“whales”). This reinforces the idea that crypto markets operate in a distinct behavioural regime compared to conventional assets.

The application of fundamental analysis in cryptocurrency markets remains constrained due to unpredictable news flows, limited regulatory standardisation, and weak linkage to macroeconomic fundamentals. Nonetheless, blockchain metrics, technological characteristics, developer activity, network use-cases, and regulatory signals remain essential components of long-term valuation.

Short-listed cryptocurrencies projected to grow in 2025–2026 (such as BTC, ETH, SOL, AVAX, TON, and others) show strong structural drivers of capitalisation growth, including institutional adoption, scalability improvements, tokenisation infrastructure, and DeFi integration.

These results indicate an ongoing market shift toward high-utility protocols.

The energy consumption of Bitcoin remains a fundamental contradiction between Proof-of-Work mechanisms and global climate goals, as BTC mining consumes more electricity annually than entire national economies. This reinforces the urgency of transitioning to energy-efficient consensus algorithms or low-carbon mining practices. The emergence of environmentally oriented blockchain solutions (such as Energy Web Token EWT) demonstrates attempts to align crypto technologies with decarbonisation policies, yet empirical evidence shows weak market demand and limited investor confidence in such ESG-themed tokens. Their conceptual value has not translated into stable financial performance.

A clear divergence exists between real-sector green energy indices and sustainability-oriented cryptoassets: while indices such as low-carbon energy and global green tech show positive annual returns, EWT continues a multi-year downward trend, signalling poor correlation with actual decarbonisation trends and highlighting the experimental status of green crypto tokens.

Institutional investors currently favour traditional green financial instruments over green cryptocurrencies, due to higher predictability, embedded real-sector cash flows, regulatory clarity, and measurable environmental contributions. In contrast, EWT and similar tokens face the challenges of high volatility, conceptual uncertainty, and weak integration into the energy market.

The overall empirical evidence suggests that the cryptocurrency market is undergoing a dual structural transition: on the one hand, toward technological maturity, institutional adoption, tokenisation and AI-enhanced blockchain models, and on the other hand - toward aligning digital asset infrastructure with the global green transition. However, this alignment remains partial. While real-sector green finance advances rapidly, environmentally oriented cryptocurrencies remain peripheral and have yet to demonstrate sustainable market traction or real-world decarbonisation impact.

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

References

- Borzenko, O., Panfilova, T., Haustov, V., Kuryliak, V., & Maksymova, I. (2025). Financial and economic trends of the rare earth market in light of global leadership. *Financial & Credit Activity: Problems of Theory & Practice*, 5(64). DOI: 10.55643/fcaptop.5.64.2025.4861
- Chen, W. D., & Murtazashvili, I. (2024). *Is cryptoaltruism transforming the nonprofit sector? Lessons from the Ukrainian nonprofits during the Russia–Ukraine War*. *Chinese Public Administration Review*, 15(1), 36–46. <https://doi.org/10.1177/15396754231222575>
- CoinMarketCap. (2025). *Cryptocurrency market capitalization charts*. Retrieved from <https://coinmarketcap.com/>
- Corobană, A. (2023). *Financial international sanctions and cryptocurrencies: Challenges and solutions*. *European Business Law Journal*. P. 71-80
- Dziubliuk, O., Manzhula, V., Stetsko, M., Maksymova, I., Petrukha, N., & Sydorovych, O. (2025). Information Insights into Effective Monetary Influence on the Economy as a Basis for Sustainable

- Development. In *2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)* (pp. 334-339). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185894>.
- Fabuš, J., Kremenova, I., Stalmašková, N., & Kvasnicova-Galovicova, T. (2024). *An empirical examination of Bitcoin's halving effects: Assessing cryptocurrency sustainability within the landscape of financial technologies*. *Journal of Risk and Financial Management*. <https://doi.org/10.3390/jrfm17060229>
- Hakimi, A., Pazuki, M. M., Salimi, M., & Amidpour, M. (2024). Renewable energy and cryptocurrency: A dual approach to economic viability and environmental sustainability. *Heliyon*, 10(22). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e39765
- Huynh, T. (2023). *When Elon Musk changes his tone, does Bitcoin adjust its tune?* *Computational Economics*. 62, 639–661. <https://doi.org/10.1007/s10614-021-10230-6>
- Investing.com. (2025). *Financial markets data and charts*. Retrieved from <https://www.investing.com/>
- Jones, B. A., Goodkind, A. L., & Berrens, R. P. (2022). Economic estimation of Bitcoin mining's climate damages demonstrates closer resemblance to digital crude than digital gold. *Scientific Reports*, 12(1), 14512.
- Koemtzopoulos, D., Zournatzidou, G., & Sariannidis, N. (2025). *Can cryptocurrencies be green? The role of stablecoins toward a carbon footprint and sustainable ecosystem*. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17020483>
- Kovács, P., & Fűrész, A. (2025). *AI-powered cryptocurrencies and sustainability: The role of intelligent blockchains in green technology development*. *9th FEB International Scientific Conference*.
- Laimon, M., & Almadadha, A. (2025). *Energy consumption of crypto mining: Consequences and sustainable solutions using systems thinking and system dynamics analysis*. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17083522>
- Lukashevych, Y., Evdokimov, V., Polukhin, A., Maksymova, I., & Tsvilii, D. (2024). Innovation in the energy sector: The transition to renewable sources as a strategic step towards sustainable development. *African Journal of Applied Research*, 10(1), 43-56. DOI: <https://doi.org/10.26437/ajar.v10i1.665>
- Maksymova, I., & Nastase, C. (2024). European model of climate-neutral business development based on digitalization principles. *Journal of European Economy*, 23(2), 336-352. DOI: <https://doi.org/10.35774/jee2024.02.336>
- Marin, O., Cioara, T., Todorean, L., Mitrea, D., & Anghel, I. (2023). *Review of blockchain tokens creation and valuation*. *Future Internet*, 15(12), 382. <https://doi.org/10.3390/fi15120382>
- Dias, R., Galvão, R., Teixeira, N., Alexandre, P., & Gonçalves, S. (2025). Efficiency of traditional and green cryptocurrencies: A comparative analysis. <https://doi.org/10.62754/joe.v4i4.6718>
- Prates, R., & Fonseca, M. W. (2024). *Do news reports and Google searches impact Bitcoin prices? An analysis of Granger causality*. *Revista de Gestão Social e Ambiental*. DOI: 10.24857/rgsa.v18n10-165
- Pysmennyi, V. (2023). *Innovative financing tools for humanitarian projects in the context of war: Ukraine's experience*. *Galic'kij ekonomičnij visnik*.
- TradingView. (2025). *Financial charts and market data*. Retrieved from <https://www.tradingview.com/>
- Vaccargiu, M., Pinna, A., Tonelli, R., & Cocco, L. (2023). *Blockchain in the energy sector for SDG achievement*. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su152014843>
- Vlahavas, G., & Vakali, A. (2024). *Dynamics between Bitcoin market trends and social media activity*. *FinTech*. <https://doi.org/10.3390/fintech3030020>
- Volosovych, S., Nezhyva, M., Vasylenko, A., Morozova, L., & Napadovskyi, I. (2024). *The cryptocurrency assets market in the conditions of military aggression*. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptp.1.54.2024.4305>
- Winotoatmojo, H. P., Lazuardy, S. Y., Arland, F., & Setyawan, A. A. (2024). *Environmental impact of cryptocurrency mining: Sustainability challenges and solutions*. *Journal of Sciencetech Research and Development*. DOI: <https://doi.org/10.56670/jsrd.v6i1.312>
- Wendl, M., Doan, M. H., & Sassen, R. (2023). The environmental impact of cryptocurrencies using proof of work and proof of stake consensus algorithms: A systematic review. *Journal of Environmental Management*, 326, 116530. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116530>



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.2025.03.02.04

Systemic Transition from a Linear to a Circular Model in the Context of Business Environment Transformation

Citation:

Bay O. (2025). Systemic Transition from a Linear to a Circular Model in the Context of Business Environment Transformation. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", Vol.3 No.2 (2025), 43–54. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.04>

Oleksandr Bay

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

e-mail: bai_ov_23546@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0006-7178-8888

Abstract: The study analyses structural changes in global resource use and identifies the key factors shaping the shift toward circularity under current environmental and economic pressures. Drawing on international analytical assessments and global material flow databases, the study analyses long-term trends in resource extraction, domestic material consumption and circularity indicators. The findings reveal a persistent dominance of primary material use and a decline in the global circularity rate, indicating that the expansion of primary extraction continues to outpace the development of secondary material flows. Significant regional disparities in material consumption patterns further demonstrate that the feasibility and pace of the circular transition vary substantially across world regions. The study identifies three systemic barriers constraining the shift to circularity: the underestimated potential of the bioeconomy, continued dependence on fossil fuels and the rapid accumulation of long-lived material stocks. These factors generate structural inertia that reinforces linear pathways and delays future circularity. The article shows that current business models insufficiently integrate repair, reuse, high-quality recycling and service-based value creation, which limits the formation of secondary resource markets and slows reductions in material intensity. The research also develops a structured model of government–business interaction, demonstrating that a successful circular transition requires coherent policy frameworks, international coordination, digital monitoring systems and strong corporate engagement. Key priorities include slowing the growth of material stocks, extending asset lifetimes, expanding regenerative biomass use, strengthening secondary material markets and establishing a global system for resource governance. The findings confirm that only a coordinated transformation of institutional mechanisms, economic incentives and business strategies can ensure a meaningful transition toward a circular economy and support long-term socio-ecological resilience.

Keywords: circular economy; green transition; global material flows; material stocks; secondary resources; sustainable business; resource efficiency; waste management; bioeconomy; digitalization.

Received: 12/12/2025

Accepted: 16/12/2025



JEL: Q56, M14, L21, O52

Systemic Transition from a Linear to a Circular Model in the Context of Business Environment Transformation

Oleksandr Bay

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

e-mail: bai_ov_23546@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0006-7178-8888

Abstract: The study analyses structural changes in global resource use and identifies the key factors shaping the shift toward circularity under current environmental and economic pressures. Drawing on international analytical assessments and global material flow databases, the study analyses long-term trends in resource extraction, domestic material consumption and circularity indicators. The findings reveal a persistent dominance of primary material use and a decline in the global circularity rate, indicating that the expansion of primary extraction continues to outpace the development of secondary material flows. Significant regional disparities in material consumption patterns further demonstrate that the feasibility and pace of the circular transition vary substantially across world regions. The study identifies three systemic barriers constraining the shift to circularity: the underestimated potential of the bioeconomy, continued dependence on fossil fuels and the rapid accumulation of long-lived material stocks. These factors generate structural inertia that reinforces linear pathways and delays future circularity. The article shows that current business models insufficiently integrate repair, reuse, high-quality recycling and service-based value creation, which limits the formation of secondary resource markets and slows reductions in material intensity. The research also develops a structured model of government–business interaction, demonstrating that a successful circular transition requires coherent policy frameworks, international coordination, digital monitoring systems and strong corporate engagement. Key priorities include slowing the growth of material stocks, extending asset lifetimes, expanding regenerative biomass use, strengthening secondary material markets and establishing a global system for resource governance. The findings confirm that only a coordinated transformation of institutional mechanisms, economic incentives and business strategies can ensure a meaningful transition toward a circular economy and support long-term socio-ecological resilience.

Keywords: circular economy; green transition; global material flows; material stocks; secondary resources; sustainable business; resource efficiency; waste management; bioeconomy; digitalization.

Introduction

Ensuring human well-being within the ecological limits of the planet has become a central challenge for contemporary societies. Modern economies are expected to support high living standards while protecting and restoring the natural systems. In contrast, the current linear model of extraction, production, consumption and disposal no longer matches the environmental and socio-economic realities of the twenty first century. This model accelerates resource depletion, intensifies environmental degradation and increases systemic vulnerability.

The circular economy has emerged as a strategic framework that can reduce material pressures and support long term resilience. Circular practices such as reuse, repair, remanufacturing and high quality recycling allow societies to decrease material throughput while maintaining or even enhancing quality of life. Moreover, these practices can also contribute to climate mitigation, biodiversity conservation and more stable patterns of development. The transition from a linear to a circular system, however, requires coordinated changes in policy, governance, market incentives and business strategies. It involves a comprehensive redesign of how value is created, delivered and maintained within economic systems.

The findings of international analytical reports demonstrate the growing urgency of systemic change. Global extraction of materials has more than tripled during the past five decades and now exceeds 100 billion tonnes each year (Wiedenhofer et al., 2024). Per capita material consumption increased from 8.4 tonnes in 1970 to 12.2 tonnes in 2023, mostly as a result of urbanisation, higher levels of income and expanding infrastructure (*International Resource Panel, 2024a*). Without significant intervention, material extraction may rise by an additional 60 percent by 2060 (International Resource Panel, 2024a). Material use is responsible for almost two thirds of global greenhouse gas emissions and for more than 90 percent of biodiversity loss and water stress (International Resource Panel, 2024b). In 2023 the scientific community confirmed that humanity had already exceeded six of the nine planetary boundaries, which makes the current trajectory of development incompatible with long term ecological and social stability (*Richardson et al., 2023*). The importance of a systemic approach to the transformation of business processes in the context of the circular transition is consistent with studies that emphasise the role of hidden (implicit) factors in organisational management and their influence on the effectiveness of business models (*Hushko et al., 2018*). The shift toward a circular model also requires recognising the strategic role of innovation and the development of renewable energy, which constitute key drivers of sustainable development and form the basis for resource-efficient approaches across various economic sectors (*Lukashevych et al., 2024*).

It should be noted that reliable indicators and baseline metrics play an essential role in guiding transition to circularity (*Hushko & Bay, 2025*). At the same time, policymakers and businesses require operational tools that can translate conceptual models into practical action.

Additionally, the transition to a circular model is increasingly shaped by rapid changes within the business environment. Companies operate in conditions characterised by resource price volatility, technological disruption, geopolitical uncertainty and expanding regulatory requirements. Furthermore, investors and consumers increasingly expect transparent, responsible and low impact business practices (*Henriques et al., 2023; Maksymova, 2024*). Companies are therefore rethinking product design, supply chain management and modes of value creation (*Blomsma et al., 2024; Di Stefano et al., 2023*). Circular business models are gaining strategic relevance because they reduce exposure to resource risks, increase operational efficiency and support long term competitiveness.

In this context the circular economy should be viewed as a comprehensive transformation of economic systems. It is not limited to waste management or efficiency improvements. It involves a systemic reorganisation of how resources are used and how business sectors respond to ecological constraints. Successful implementation requires evidence based policy, institutional coordination and adaptive business strategies that can support the transition from linearity to circularity under conditions of global change.

Materials and Methods

The research is based on a combination of quantitative and qualitative methods aimed at identifying structural patterns in global material flows and assessing the systemic factors that shape the transition from linear to circular economic models.

Stage 1. Analytical Framework and Data Sources. The empirical analysis relies on open global datasets, including the International Resource Panel Global Material Flows Database, the Circularity Gap Report metrics, as well as regional material consumption indicators published on public statistical platforms (Our World in Data, UNEP resource dashboards). These sources provide harmonized time series on extraction, material use, domestic material consumption per capita, biomass composition, fossil resource dependence and circularity levels. The structure of global material flows is examined through a three-component model distinguishing circular, linear and potentially circular flows. This framework allows evaluation of secondary material supply, primary resource dependence, and the long-term accumulation of material stocks.

Stage 2. Quantitative Methods. Descriptive statistical analysis is applied to identify long-term trends in global extraction volumes, changes in circularity rates and regional differences in domestic

material consumption. Comparative analysis is used to assess disparities between world regions and sectors. Structural decomposition of input and output flows enables examination of the balance between primary extraction, secondary materials, biomass and waste generation.

Stage 3. Qualitative Methods. A problem-oriented analytical approach is employed to identify systemic barriers in the circular transition. This includes expert interpretation of the roles of bio-transition, fossil-fuel dependency and stock accumulation based on international scientific assessments. To evaluate the interaction between governments and businesses, a comparative institutional analysis is used. This approach enables the identification of policy gaps, coordination failures and opportunities for scaling circular practices across sectors.

Overall, the combination of multi-source data, structural analysis and integrated methodological approaches provides a comprehensive basis for examining the dynamics of material use, evaluating circularity challenges and identifying strategic directions for business-environment transformation.

Results

The analysis of global material flows shows that the current economic system is unable to secure long term well-being within safe ecological limits. This finding reinforces the growing need for a systemic transition from linear to circular models of production and consumption. The circular economy provides an alternative to established linear practices that no longer align with the requirements of societies or the capacities of natural ecosystems. Over the past seven years the share of secondary materials in total material use has become a widely recognized indicator of progress toward circularity, as reflected in the Circularity Gap Report. This metric offers an important benchmark, although it represents only one component of a much broader material system. Furthermore, domestic material consumption per capita illustrates how different parts of the world continue to rely on highly material intensive development pathways, reflecting structural inequalities in economic models, industrial composition and resource dependency. These differences are particularly relevant in the context of a systemic transition, as the feasibility and pace of moving from linear to circular models vary significantly across regions (Fig. 1).

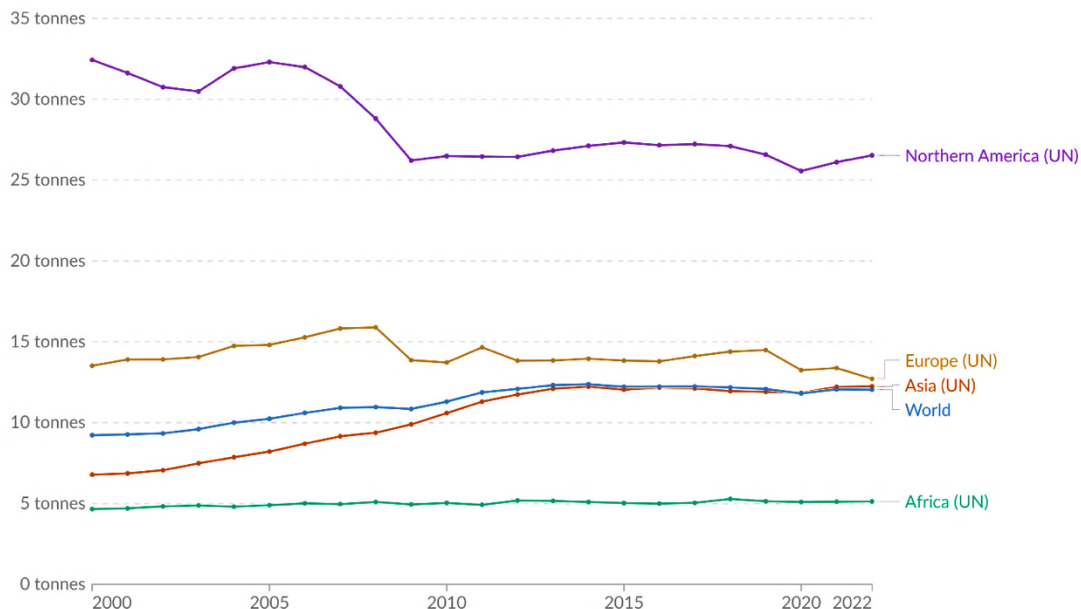


Figure 1. Domestic material consumption per capita across world regions

Source: Compiled in ourworldindata.org dashboard

Material flows that enter, circulate within or leave the global economy can be grouped into three categories. Each category reflects distinct patterns of resource use and reveals specific barriers and opportunities for circular transformation (Fig. 2).

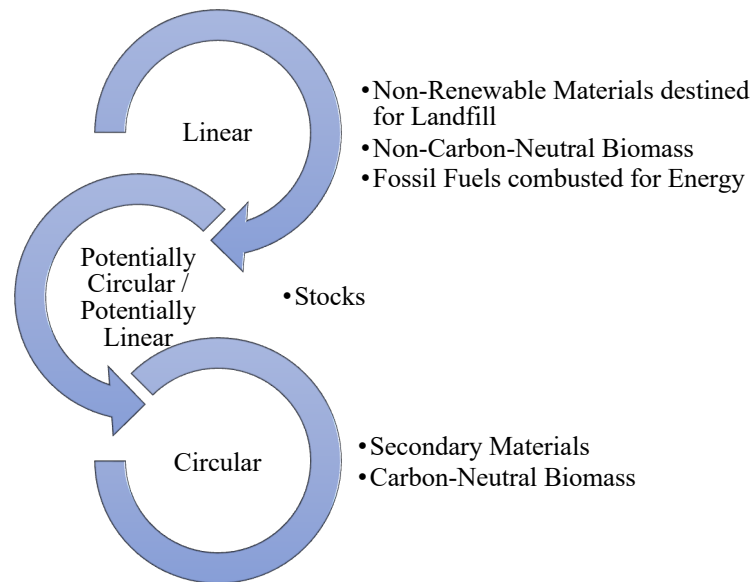


Figure 2. Structure of Material Flows in the Transition from a Linear to a Circular Economy

Source: Circularity Gap Report (Circle Economy, 2025)

The diagram distinguishes three categories of material flows. Each category represents a specific role within the broader system of resource use.

The first category includes circular flows. These consist of two types of materials. The first type includes secondary materials, which originate from recovered or recycled resources that can re-enter production systems. The second type includes carbon neutral biomass, which is derived from biological resources that maintain a balanced carbon cycle through natural regeneration. Both groups contribute to circularity by supporting material efficiency and reducing waste.

The second category includes linear flows. These flows represent materials that do not return to productive use. They include non-renewable materials that are sent to landfill, non-carbon neutral biomass, and fossil fuels used for energy production. These flows reflect the logic of the conventional linear economy. They indicate continued dependence on extraction and disposal. Their presence highlights the persistence of unsustainable resource use patterns.

The third category includes flows that are potentially circular or potentially linear. This group consists of material stocks such as buildings, infrastructure, equipment and machinery. These stocks accumulate over long periods of time. They may become valuable sources of secondary materials if recovered in the future. They may also become large waste streams if recovery systems and technologies remain insufficient. Their trajectory depends on design choices, waste management practices and policy interventions.

The diagram also demonstrates that circularity relies on the expansion of secondary materials and balanced biomass use. Linear flows and material stocks remain critical points of intervention for policymakers and businesses that seek to accelerate the shift from linear to circular models. Potentially circular flows originate from long term material stocks. Some of these stocks may become sources of secondary materials in the future, while others may be lost if recovery systems are not sufficiently developed. Their role depends on design choices, technological progress and policy measures that influence how materials are managed at the end of their service life.

The results indicate that global material cycles remain predominantly linear (Fig. 3).

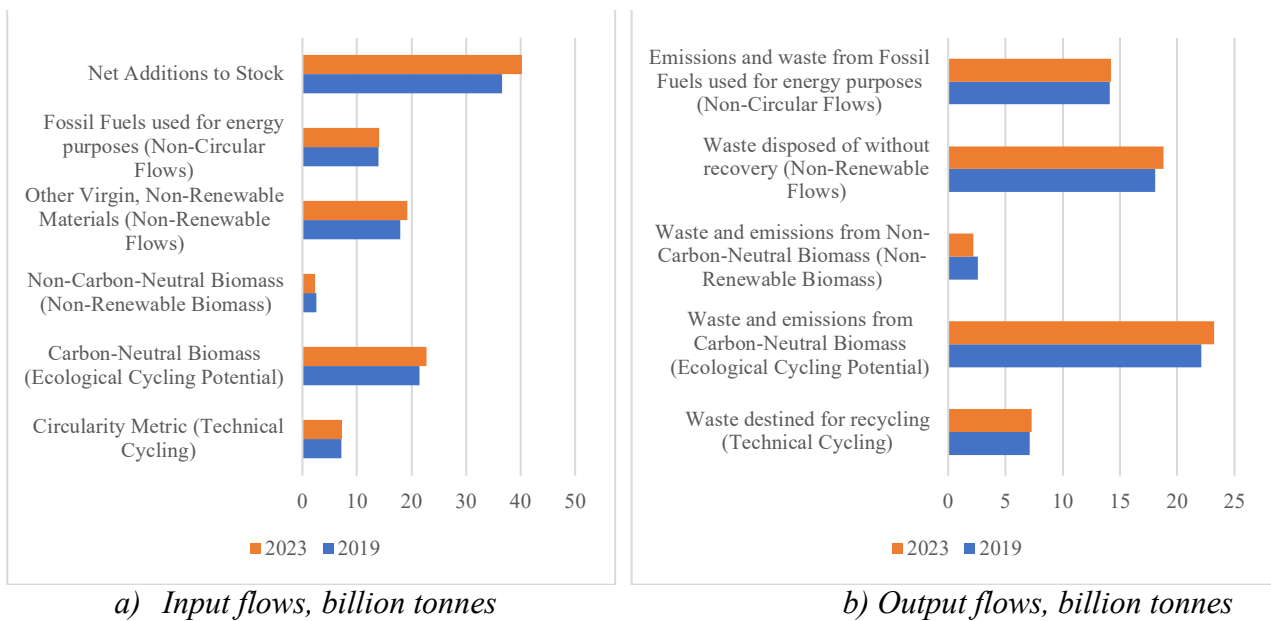


Figure 3. Linear via Circular flows balance

Source: author's development based on database (International Resource Panel, 2024a)

The most recent analysis shows a further decline in the global circularity rate. The majority of materials entering the world economy continue to originate from primary sources, while the share of secondary materials decreased from 7.2 percent to 6.9 percent. This confirms that the use of primary resources is growing much faster than the availability of secondary inputs. The expansion of primary extraction is therefore outpacing the development of circular material flows.

The share of secondary materials is too small to ensure a stable material balance, and large additions to stocks create a delay in future circularity that may last for decades. This structural inertia limits the pace of transition. At the same time, a clear understanding of the relationships among the three categories of material flows makes it possible to identify policy, economic and technological interventions that can accelerate the shift towards a circular economy at the global level. The development of reliable indicators is essential for guiding decisions, monitoring progress and supporting systemic transformation within the business environment and across economic systems.

The persistent increase in total material consumption is a central factor behind the falling circularity rate. Although the absolute volume of secondary materials is rising slowly, it remains too small to balance the rapid growth in primary resource use. Global material extraction has more than tripled over the past fifty years and has recently exceeded one hundred billion tonnes per year. If systemic changes are not introduced, this figure is expected to grow by another sixty percent by 2060 (Soonsawad et al., 2024). These trends indicate that the global economy is still deeply rooted in linear resource use, which limits the potential for a transition towards a circular model and increases long term environmental pressures.

Achieving a genuinely circular model of development requires a substantial reduction in the material intensity of the global economy. This transition demands a deep restructuring of production and consumption systems, which directly affects how businesses create value, manage resources and interact with supply chains. Firms in construction, transport and manufacturing operate within sectors with high material dependency, and their transformation is essential for closing material loops. Without business adoption of circular principles and investment in redesigning operations, the shift from linear to circular models will remain incomplete.

There is also a considerable untapped potential for increasing circularity through the recovery of materials that could technically be returned to productive use but are not yet captured by existing business practices. A large share of primary non renewable resources that end up in landfill reflects not only technological barriers but also gaps in corporate collection systems, reverse logistics and economic incentives. These materials include heavy industrial residues, short lived consumer goods

and end of life machinery. If businesses integrated stronger take back schemes, adopted circular procurement and invested in recycling infrastructure, the share of secondary materials could rise to approximately 25 percent (*Mallick et al., 2023*). This demonstrates the scale of unrealised opportunities within global value chains.

Additional opportunities for higher circularity are associated with improved management of construction and demolition waste and the recovery of smaller material streams such as municipal solid waste. Many companies still face difficulties processing complex waste fractions that include mixed building debris and contaminated soils. These challenges reflect limitations in current business models, which often prioritise low cost disposal over long term resource efficiency. The situation underscores the need for corporate strategies that minimise waste generation at the design stage, extend product lifetimes and support high quality reuse and recycling wherever this is technologically and economically feasible.

In an ideal circular model societies would rely mainly on secondary materials while decreasing the extraction of primary resources and overall material demand. Achieving such a system requires businesses to embrace principles of material efficiency and sufficiency, prioritise recycled inputs and integrate circular design across product development cycles. Long lived stocks such as buildings and infrastructure would be managed as material reservoirs, enabling future recovery through industrial symbiosis, digital tracking and circular business platforms. At the national level governments would strengthen systems of collection, recycling and waste treatment, while businesses would play a central role in reducing resource losses along supply chains from extraction to end of life.

These systemic trends have direct implications for the business environment. Companies operate under increasing pressure from regulators, investors and consumers to reduce environmental impacts, improve transparency and adopt circular practices. Circular strategies allow firms to enhance resilience, increase operational efficiency and create new forms of value through services, reuse, refurbishment and remanufacturing.

At the same time businesses encounter persistent barriers such as:

- high upfront costs,
- technological uncertainty,
- limited market demand for secondary materials,
- fragmented regulatory frameworks.

These challenges shape the pace of the linear to circular transition and highlight the need to identify the most pressing problems faced by companies in the contemporary business environment.

Consequently, key problems in the “Linear to Circular Transition” should be delineated.

Problem 1. Limited understanding of the role of the bio-transition in business environment and global economy as a whole.

An important aspect is that biomass represents a substantial share of global material flows, with 21.5 percent classified as carbon neutral and 2.2 percent as non carbon neutral (*Vitunskienė et al., 2022*). Yet its contribution to the circular transition remains significantly underestimated. Formal carbon neutrality does not reflect the wider environmental impacts associated with biomass extraction, including soil degradation, biodiversity loss, ecosystem disruption and imbalances in nutrient cycles. It also remains uncertain whether nutrients are returned to the biosphere at the required scale and speed to ensure ecological regeneration.

Although the share of non carbon neutral biomass is relatively small, it still accounts for almost one tenth of total biomass use and remains essential to minimise. Biomass extraction has more than doubled over the past fifty years, driving land use change, agricultural expansion and additional global emissions. A sustainable circular transition will require a profound transformation of food systems and business models across agriculture, food processing and retail. Reduced dependence on intensive agriculture and greater adoption of regenerative and plant based solutions will be necessary. These changes imply significant shifts in corporate supply chains, product design, sourcing strategies and investment priorities.

Problem 2. Persistent dependence on fossil fuels and weak incentives for phase out by national economies and business.

Despite a relative decline in the share of fossil resources within total extraction, their absolute volumes continue to rise. Global fossil fuel extraction increased from 6.1 billion tonnes in 1970 to 15.8 billion tonnes in 2022, while fossil resources account for 13.3 percent of the materials entering the global economy and remain a central driver of the climate crisis (Boehm et al., 2023). Energy sector generates 73 percent of global greenhouse gas emissions, excluding land use and land use change. Fossil fuels still provide 82 percent of the world's primary energy supply and convergence of this processes remains unstable (Krysovaty et al., 2024).

The demand for fossil energy has historically been coupled with economic growth, and this dynamic continues to shape business behaviour. Fossil fuel use is supported by artificially low prices and large public subsidies that reached an estimated 1.2-1.5 trillion USD in 2025. Moreover, associated environmental externalities are estimated at USD 10.5–22.6 trillion per year, highlighting the true *hidden costs* of fossil fuel use (Reyes-García et al., 2025). These conditions create strong disincentives for companies to transition toward low carbon energy systems.

A shift to net zero energy opens the possibility of reducing fossil fuel dependence, but it requires a deep transformation of transport, energy and industrial infrastructure. This transition will be material intensive. However, thoughtful design and strategic decisions by businesses can significantly reduce long term material needs. Practices that prioritise durability, repairability and high quality recycling will be essential for minimising the environmental impact of new infrastructure and technologies. Unlike the current model that relies on continuous expansion of fossil extraction, circular principles allow businesses to reduce both present and future pressures on natural systems.

Problem 3. Excessive accumulation of material stocks as a major driver of resource extraction.

The rapid growth of material stocks such as buildings, infrastructure, vehicles and machinery has become one of the strongest factors driving global resource extraction. Today 38 percent of all materials entering the world economy are primary resources added to long term stocks (Wiedenhofer et al., 2024). These stocks largely consist of non metallic minerals and metals that support urban development and industrial systems. While material stocks are not inherently negative, their formation is highly material intensive.

The total mass of global material stocks increased twenty three times over the twentieth century and continues to rise alongside urbanisation and economic growth. By 2050 urban populations will expand by an additional 2.5 billion people, primarily in low and middle income countries (Plank et al., 2022). This shift will require significant new material inputs. For these countries there is a critical opportunity to embed circular principles at an early stage of development and to avoid inefficiencies that characterised the expansion of advanced economies. For high income countries with already extensive material stocks the priority shifts toward minimising new material inputs, extending asset lifetimes, modernising existing structures and promoting reuse, renovation and repair.

These trends have direct implications for business. Companies involved in construction, manufacturing, logistics and infrastructure provision must redesign their operations to manage material stocks more efficiently. They need to invest in circular design, digital material passports, modular construction and reverse logistics systems. By treating material stocks as future resource reservoirs businesses can create new value streams while reducing extraction pressures and improving resilience.

The analysis of these three systemic problems demonstrates that the global economy remains structurally dependent on linear patterns of resource use. Material stocks continue to expand, fossil fuels still dominate energy systems and the potential of the bioeconomy remains insufficiently explored. These dynamics increase long term environmental pressures and slow the shift towards a circular model. At the same time they reveal clear points of intervention where targeted actions by governments and businesses can accelerate the transition. Based on the evidence presented above, several strategic directions can guide more effective decision making.

First, it is essential to limit the growth rate of material stocks. Governments and businesses need clear global and national targets that define acceptable levels and growth dynamics in construction

and infrastructure. Without such targets it is difficult to manage material intensity or address ecological risks in a timely manner.

Second, priority should be given to extending the lifetimes of existing assets. Repair, refurbishment, retrofitting and modernisation should become standard practices. These measures reduce the demand for new materials and lower the overall pressure on resource systems.

Third, material stocks should be designed for durability and circularity. Buildings and infrastructure must be created in ways that enable easy repair, disassembly and high quality recycling at the end of their service life. Such design choices support long term availability of secondary materials.

Fourth, the use of renewable and low impact materials should be expanded. Stocks should increasingly incorporate sustainable timber, biocement and biocomposites, provided that their production and use comply with circularity principles.

Fifth, operations should be localised where possible in order to reduce energy consumption. Local production and construction processes minimise transport distances, lower logistical emissions and improve the overall efficiency of material flows.

Sixth, both existing and new material flows must be optimised through circular design. Integrating circular principles at the earliest design stages helps prevent unnecessary stock growth and ensures that materials are used efficiently across multiple life cycles.

A successful transition from a linear to a circular economic model requires coordinated action from both governments and businesses. Each actor plays a distinct yet interdependent role in shaping the enabling conditions, implementing circular practices and scaling system level changes (Table 1).

Table 1. Role of Business and Government in the Systemic Transition to a Circular Economy

Actor	Strategic Role	Key Actions
Governments	Leadership for circular transition	National circularity vision; multilateral cooperation; tax shift to circular models; redirecting subsidies; public funding for innovation
	International coordination	Managing global material flows; participation in international agreements; establishing international resource governance
	Monitoring and accountability	Circularity indicators; national targets; data-based policy adjustment
Business	Operational and supply chain circularity	Material recovery; local supply chains; service-based business models; measuring circularity
	Resilience and risk reduction	Reducing exposure to resource scarcity and geopolitical instability; lowering dependence on volatile global markets
	New markets and competitiveness	Service-based revenue models; proactive adaptation to regulation; leadership in digital and low-carbon technologies
	Sector-wide scaling	Transparency; industrial symbiosis; collaboration with governments

Source: constructed by the author

Governments hold a critical opportunity to lead the global transition toward a circular economy by establishing coherent policy frameworks and enabling transparent multilateral cooperation. Clear long term visions, consistent support for circular initiatives and fair market conditions are essential for creating an environment in which circularity can expand. Key actions include shifting the tax burden from linear to circular models, redirecting subsidies away from resource intensive sectors and allocating public financial flows to circular projects and innovation. These measures influence not

only national development strategies but also the broader business environment in which companies operate.

However, yet no country can address resource overuse in isolation. Effective transition requires strong international coordination and, where possible, joint action to manage global material flows. Despite increasing awareness of planetary limits, the current global landscape lacks clear targets and does not possess a governance structure capable of systematically tracking resource use worldwide. This institutional gap limits the ability of both governments and businesses to align their actions with long term sustainability goals.

An international institution dedicated to resource governance could provide science based assessments, policy recommendations and reliable benchmarks. Emerging negotiations on a global agreement on plastic pollution illustrate the relevance of such mechanisms. At the national level governments should select and monitor robust indicators similar to those discussed in this report, ensure transparency and adjust policy based on new data. Reliable monitoring systems strengthen accountability and create predictable conditions for businesses planning circular investments.

Business plays an equally important role in the transition. Companies that adopt circular strategies, such as material recovery, closed loop production models and localised supply chains, can reduce exposure to volatile global markets and lower operational risks. To maximise the effectiveness of these actions firms must consider not only their internal operations but also the broader context of circularity reflected in global indicators. Transparent reporting on progress can accelerate the spread of circular practices across sectors.

Collaboration among companies is essential. Knowledge exchange, industrial symbiosis, the development of service based business models and close cooperation with governments help overcome systemic barriers and support the creation of circular markets. Firms that already implement circular practices can gain a competitive edge by securing new revenue streams, improving resilience to resource scarcity and reducing vulnerability to geopolitical disruptions. In an increasingly unstable global economy companies that anticipate regulatory shifts and lead the transition can not only adapt to emerging conditions but also contribute to shaping large scale circular systems.

Conclusions

Despite intensive proclamation of the green course, the global economic landscape remains structurally linear, as demonstrated by the persistent dominance of primary resource extraction and the decline in the global circularity rate from 7.2% to 6.9%. This indicates that the growth of primary material use continues to outpace the development of secondary material flows, undermining progress toward climate neutrality and long-term resource efficiency. The analysis of domestic material consumption per capita across world regions reveals pronounced inequalities in material-intensive development pathways. High levels of resource use in North America and Europe, combined with rapidly increasing DMC in Asian economies, indicate that the feasibility and pace of circular transition remain highly uneven across global regions and require differentiated policy approaches.

Additionally, the structure of global material flows illustrates the strong predominance of linear flows and the limited contribution of circular flows to the global material balance. Potentially circular flows (long-term material stocks in buildings, infrastructure and machinery) represent the largest share of accumulated materials and may become future waste streams if recovery systems and circular design principles are not strengthened. The balance of linear versus circular flows confirms that more than 90% of materials entering the global economy are either added to long-lived stocks or lost as waste. Such structural inertia creates a “circularity delay,” whereby decisions made today in construction, infrastructure and industrial systems will determine the availability of secondary materials for decades.

The limited integration of secondary materials into business operations constrains opportunities for circularity. Despite the technical potential to raise recycling rates to approximately 25%,

insufficient collection systems, weak market incentives and a lack of circular product design maintain high dependence on primary resources.

The rapid accumulation of material stocks has become one of the principal drivers of resource extraction. With 38% of all extracted materials annually added to long-term stocks, circular transition strategies must prioritise lifetime extension, renovation, modularity and repurposing, especially in highly urbanised economies with saturated infrastructure systems.

A successful circular transition also requires a deeper transformation of the bioeconomy. Although biomass accounts for a significant share of global material flows, its circular potential remains underutilised. Regenerative agricultural practices, circular food systems and resource-efficient biomass management must become core elements of business strategies to reduce land degradation, biodiversity loss and nutrient imbalances.

The conducted research highlights that the transition to a circular economy is feasible only through coordinated action between governments and businesses. Governments provide the institutional framework (such as circularity indicators, tax reforms, subsidy alignment, international coordination and data-driven policymaking) while businesses operationalise circularity through material recovery, service-oriented models, localised supply chains and industrial symbiosis.

Circular practices significantly enhance business resilience by reducing exposure to resource price volatility, geopolitical disruptions and supply chain instability. Firms that transition to reuse, repair, remanufacturing and service-based value creation gain long-term competitive advantages, while those dependent on primary extraction increase their operational and strategic risks.

The systemic transition from a linear to a circular model requires the establishment of an international governance mechanism for global material flows. The absence of a global authority setting resource targets, monitoring extraction and consumption, and harmonising policy efforts creates fragmentation and slows corporate investments in circularity. A coherent international resource governance system is therefore a critical precondition for large-scale business environment transformation.

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Funding

This study did not receive external funding.

References

- Blomsma, F., Bauwens, T., Weissbrod, I., & Kirchherr, J. (2023). The 'need for speed': Towards circular disruption—What it is, how to make it happen and how to know it's happening. *Business Strategy and the Environment*, 32(3), 1010-1031. <https://doi.org/10.1002/bse.3106>
- Boehm, S., Jeffery, L., Hecke, J., Schumer, C., Jaeger, J., Fyson, C., ... & Daly, E. (2023). *State of Climate Action 2023*. World Resources Institute. Berlin and Cologne, Germany, San Francisco, CA, and Washington, DC.
- Circle Economy. (2025). *The Circularity Gap Report 2025: A circular economy to live within the safe limits of the planet*. Circle Economy.
- Di Stefano, C., Elia, S., Garrone, P., & Piscitello, L. (2023). The Circular Economy as a new production paradigm to enhance resilience of MNEs and the economic system. *AIB insights*, 23(3), 1-7. DOI:10.46697/001c.74163
- Henriques, R., Figueiredo, F., & Nunes, J. (2023). Consumers' Perspectives on Circular Economy: Main Tendencies for Market Valorization. *Sustainability (Switzerland)*, 15 (19), 1–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151914292>

- Hushko, S., & Bay, O. (2025). ECOLOGIZATION OF INDUSTRY IN ACCORDANCE WITH THE EU CIRCULAR ECONOMY INDICATIVE FRAMEWORK. *Sustainable Economic Development*, (5 (56)), 170-179. DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2025-56-24>
- Hushko, S., Kryshchuk, I., Temchenko, H., & Maksymova, I. (2018). Modelling of management activity of the organization considering the impact of implicit factors in business processes. *East European Journal of Advanced Technologies*, 1(3 (91)), 13-21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.121647
- International Resource Panel. (2024a). Global resources outlook 2024: Bend the trend: Pathways to a liveable planet as resource use spikes. United Nations Environment Programme.
- International Resource Panel. (2024b). Global resources outlook 2024: Bend the trend: Pathways to a liveable planet as resource use spikes. United Nations Environment Programme.
- Krysovaty, A., Maksymova, I., Kurilyak, V., Radin, M., & Kurilyak, M. (2024). International convergence towards a climate-neutral economy: modeling the agricultural sector. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 10(2), 52-79. DOI: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.355962>
- Lukashevych, Y., Evdokimov, V., Polukhin, A., Maksymova, I., & Tsvilii, D. (2024). Innovation in the energy sector: The transition to renewable sources as a strategic step towards sustainable development. *African Journal of Applied Research*, 10(1), 43-56. DOI: <https://doi.org/10.26437/ajar.v10i1.665>
- Maksymova, I. I. (2024). The role of digitalisation in supporting global ESG initiatives: international business's transition to climate neutrality. *Investments: practice and experience*, (6), 103-110. DOI: 10.32702/2306-6814.2024.6.103
- Mallick, P. K., Salling, K. B., Pigosso, D. C., & McAloone, T. C. (2023). Closing the loop: Establishing reverse logistics for a circular economy, a systematic review. *Journal of environmental management*, 328, 117017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117017>
- Plank, B., Streeck, J., Virag, D., Krausmann, F., Haberl, H., & Wiedenhofer, D. (2022). From resource extraction to manufacturing and construction: flows of stock-building materials in 177 countries from 1900 to 2016. *Resources, Conservation and Recycling*, 179, 106122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106122>
- Reyes-García, V., Villasante, S., Benessaiah, K., Pandit, R., Agrawal, A., Claudet, J., ... & Zinngrebe, Y. (2025). The costs of subsidies and externalities of economic activities driving nature decline. *Ambio*, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-025-02147-3>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bennndsten, J., Cornell, S., Donges, J., et al. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Soonsawad, N., Marcos-Martinez, R., & Schandl, H. (2024). City-scale assessment of the material and environmental footprint of buildings using an advanced building information model: A case study from Canberra, Australia. *Journal of Industrial Ecology*, 28(2), 247-261. <https://doi.org/10.1111/jiec.13456>
- Vitunskienė, V., Aleksandravičienė, A., & Ramanauskė, N. (2022). Spatio-temporal assessment of biomass self-sufficiency in the European Union. *Sustainability*, 14(3), 1897. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14031897>
- Wiedenhofer, D., Baumgart, A., Matej, S., Virág, D., Kalt, G., Lanau, M., & Haberl, H. (2024). Mapping and modelling global mobility infrastructure stocks, material flows and their embodied greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139742>



JEL: C22, C53, G17, Q41, Q43

DOI: 10.62911/ete.2025.03.02.05

Forecasting Energy Market Dynamics with ARIMA approaches and Complex Network Indicators

Citation:

Bielinskyi, A., Solovieva, V., Radko, V., Seleznev, M., & Pavlysh, T. (2025). Forecasting Energy Market Dynamics with ARIMA approaches and Complex Network Indicators. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", Vol.3 No.2 (2025), 55–65 <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.05>

Andrii Bielinskyi

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

e-mail: bielinskyi@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0002-2821-2895

Victoria Solovieva

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

e-mail: solovieva_vv@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8090-9569

Viktoriia Radko

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

e-mail: radko_vm@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-0351-2573

Maksym Seleznev

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

e-mail: seleznev@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0009-0009-6697-9358

Tetiana Pavlysh

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

e-mail: pavlysh@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-5288-5301

Abstract: This study develops and evaluates a hybrid forecasting framework for energy market dynamics that combines classical econometrics with complex network science. Using daily West Texas Intermediate (WTI) spot prices from May 23, 1990 to October 30, 2025, we target short-horizon risk by forecasting 7-day forward returns, standardized via a rolling 50-day mean and volatility to mitigate heteroskedasticity. The univariate price series is mapped into Natural Visibility Graphs (NVGs) on rolling windows ($L = 25, 50, 75, 100$ days), and a vector of topological descriptors is extracted at each step, including spectral measures (e.g., algebraic connectivity, spectral gap, natural connectivity, graph energy) and centrality/efficiency and clustering indicators (e.g., global efficiency, harmonic centrality, betweenness, maximum degree, clustering, assortativity). These metrics serve as exogenous regressors in an ARIMAX model, enabling the forecasting engine to incorporate structural information embedded in the geometry of price history. Empirical results show that NVG topology exhibits regime-dependent signatures: crisis episodes are associated with sharp shifts in centralization and connectivity, and several network indicators become statistically significant predictors of standardized 7-day returns. In particular, global efficiency and harmonic centrality repeatedly emerge as dominant covariates, with coefficient signs varying across window lengths, consistent with multi-timescale market behavior. The sample is split into a pre-2020 training set and a post-2020 testing set to stress-test robustness under extreme events. The findings highlight heterogeneous horizons in oil price dynamics and the value of NVG features for practical forecasting and monitoring.

Keywords: WTI crude oil; energy market forecasting; ARIMA; natural visibility graph; complex network indicators; spectral graph measures; harmonic centrality; global efficiency; early-warning signals.

Received: 15/12/2025

Accepted: 19/12/2025



JEL: C22, C53, G17, Q41, Q43

Forecasting Energy Market Dynamics with ARIMA approaches and Complex Network Indicators

Andrii Bielinkyi

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

e-mail: bielinskyi@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0002-2821-2895

Victoria Solovieva

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

e-mail: solovieva_vv@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8090-9569

Viktoriia Radko

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

e-mail: radko_vm@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-0351-2573

Maksym Seleznev

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

e-mail: seleznev@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0009-0009-6697-9358

Tetiana Pavlysh

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

e-mail: pavlysh@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-5288-5301

Abstract: This study develops and evaluates a hybrid forecasting framework for energy market dynamics that combines classical econometrics with complex network science. Using daily West Texas Intermediate (WTI) spot prices from May 23, 1990 to October 30, 2025, we target short-horizon risk by forecasting 7-day forward returns, standardized via a rolling 50-day mean and volatility to mitigate heteroskedasticity. The univariate price series is mapped into Natural Visibility Graphs (NVGs) on rolling windows ($L = 25, 50, 75, 100$ days), and a vector of topological descriptors is extracted at each step, including spectral measures (e.g., algebraic connectivity, spectral gap, natural connectivity, graph energy) and centrality/efficiency and clustering indicators (e.g., global efficiency, harmonic centrality, betweenness, maximum degree, clustering, assortativity). These metrics serve as exogenous regressors in an ARIMAX model, enabling the forecasting engine to incorporate structural information embedded in the geometry of price history. Empirical results show that NVG topology exhibits regime-dependent signatures: crisis episodes are associated with sharp shifts in centralization and connectivity, and several network indicators become statistically significant predictors of standardized 7-day returns. In particular, global efficiency and harmonic centrality repeatedly emerge as dominant covariates, with coefficient signs varying across window lengths, consistent with multi-timescale market behavior. The sample is split into a pre-2020 training set and a post-2020 testing set to stress-test robustness under extreme events. The findings highlight heterogeneous horizons in oil price dynamics and the value of NVG features for practical forecasting and monitoring.

Keywords: WTI crude oil; energy market forecasting; ARIMA; natural visibility graph; complex network indicators; spectral graph measures; harmonic centrality; global efficiency; early-warning signals.

Introduction

The global energy landscape, dominated by the vicissitudes of the crude oil market, stands as one of the most complex and consequential economic systems in the modern world. Crude oil is not merely a fungible commodity; it is the lifeblood of industrial civilization, a geopolitical weapon, and a primary input variable for macroeconomic stability. The dynamics of crude oil prices – historically characterized by extreme volatility, non-linear regime shifts, and susceptibility to exogenous shocks – present a formidable challenge to economists, policymakers, and financial analysts (*Hamilton, 2009; Kilian, 2009*). Accurate forecasting of these price movements is paramount, not only for the profitability of trading desks but for the formulation of fiscal policies in producing nations and inflation management in consuming economies.

However, the traditional econometric toolkit, heavily reliant on linear paradigms such as the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) model, faces diminishing returns in an era defined by hyper-connectivity and structural chaos (*Box et al., 2015; Hyndman & Athanasopoulos, 2021*). While these models provide a robust baseline for capturing linear autocorrelations, they frequently fail to account for the “black swan” events and complex internal dynamics that define turbulent market regimes (*Taleb, 2007*). This research report proposes and evaluates a novel methodological framework: the augmentation of classical ARIMA approaches with advanced topological indicators derived from complex network theory. By transforming time series data into Natural Visibility Graphs (NVGs), we hypothesize that the geometric and topological structure of price history contains latent predictive information that can significantly enhance forecasting accuracy during periods of market stress (*Lacasa et al., 2008*). This hypothesis is consistent with prior early-warning research demonstrating that entropy-based complexity measures can reveal precursors to crash-like events in financial markets (*Bielinskyi et al., 2026*).

The contemporary energy market operates under the pressure of a “trilemma”: the competing demands of security, affordability, and sustainability (*World Energy Council, 2022*). This structural tension exacerbates volatility. Historically, oil prices have been driven by a relatively straightforward calculus of OPEC supply quotas and OECD demand. Today, however, the market is influenced by a chaotic confluence of factors: the rapid elasticity of US shale production, the unpredictable demand shocks of post-pandemic recovery, the geopolitical fracturing of global supply chains (exemplified by the Russia-Ukraine conflict), and the long-term uncertainty introduced by the green energy transition (*International Energy Agency, 2023; Smith, 2017*).

The West Texas Intermediate (WTI) crude oil price, the primary focus of this study, serves as a barometer for these tensions. A cursory examination of WTI price history from 1990 to 2025 reveals a trajectory that defies simple linear extrapolation. The Gulf War spikes of the early 1990s, the demand-driven supercycle of the mid-2000s, the financial collapse of 2008, the supply glut of 2014, and the unprecedented negative prices of April 2020 all represent distinct “regimes” or phases of the market (*U.S. Energy Information Administration, 2020*). Standard time series models often assume stationarity or stable variance (homoscedasticity) after differencing, an assumption that crumbles in the face of such multifractal behavior (*Álvarez-Ramírez et al., 2002*). Such multifractal features and cross-market dependencies have been documented in related financial contexts, highlighting that market dynamics often reflect coupled, non-linear structures rather than isolated processes (*Bielinskyi et al., 2023a*).

The limitations of linear modeling in this context are well-documented. ARIMA models, while mathematically elegant, essentially view the future as a linear combination of the past (*Box et al., 2015; Hyndman & Athanasopoulos, 2021*). They are “blind” to the structural texture of the data. For instance, an ARIMA model might perceive a stable uptrend and a volatile pre-crash bubble as statistically similar if their immediate autocorrelation functions align, missing the fragility inherent

in the bubble's structure. This study seeks to remedy this blindness by equipping the forecasting model with "vision" – specifically, the ability to see the topological shape of the time series through graph theory (Newman, 2010).

The intellectual foundation of this research lies in the convergence of economics with statistical physics – a domain often termed "Econophysics". This interdisciplinary approach treats financial markets not as equilibrium systems governed by rational agents, but as complex adaptive systems characterized by disorder, fluctuations, and emergent phenomena (Mantegna & Stanley, 2000).

The scientific legitimacy of modeling such complex systems has received significant validation from the highest levels of the physics community. The 2021 Nobel Prize in Physics was awarded to Syukuro Manabe, Klaus Hasselmann, and Giorgio Parisi (Nobel Prize Outreach, 2021). Parisi's work, in particular, on "the discovery of the interplay of disorder and fluctuations in physical systems from atomic to planetary scales", provides a theoretical analog for financial markets. Just as spin glasses in physics exhibit frustration and multiple equilibria, financial markets exhibit competing narratives and sudden phase transitions (crashes). This perspective is also supported by empirical work framing stock market crashes as phase transitions, reinforcing the use of tools borrowed from statistical physics for analyzing market instabilities (Bielinskyi et al., 2023b). Furthermore, the 2024 Nobel Prize in Physics, awarded to John J. Hopfield and Geoffrey E. Hinton for foundational discoveries in artificial neural networks, underscores the utility of network-based approaches in decoding complex patterns (Nobel Prize Outreach, 2024).

In this context, the financial time series is no longer seen as a mere sequence of numbers but as the output of a high-dimensional dynamic system. The challenge is to reconstruct the "phase space" of this system to understand its trajectory (Takens, 1981). While methods like embedding dimensions and Lyapunov exponents have been used for decades, they are often sensitive to noise and require massive datasets (Eckmann et al., 1986). Recent work has also shown that energy-related markets can exhibit identifiable states of irreversibility, reinforcing the view that regime changes reflect deeper structural transitions rather than simple linear deviations (Bielinskyi et al., 2024). Network science offers a more robust alternative: mapping the time series into a graph (Newman, 2010).

The core innovation utilized in this study is the NVG algorithm. Introduced by Lacasa et al., this method transforms a time series into a complex network based on a geometric criterion: two data points are connected if they have a direct "line of sight" to each other on a plot.

This transformation is not merely an aesthetic exercise; it is a rigorous mathematical mapping that preserves the information content of the signal while exposing its structural properties (Lacasa et al., 2008).

- **Periodic series** map to regular, lattice-like graphs.
- **Random series** (white noise) map to random graphs with exponential degree distributions.
- **Fractal series** (like financial markets) map to scale-free networks with power-law degree distributions.

By converting the WTI price series into a sequence of evolving graphs, we can utilize the vast arsenal of network topology metrics – clustering coefficients, harmonic centrality, global efficiency, and spectral measures – to quantify the state of the market (Chung, 1997; Latora & Marchiori, 2001; Rochat, 2009; Watts & Strogatz, 1998). These metrics act as "sensors" for the market's internal structure. For example, a sudden drop in the "Global Efficiency" of the visibility graph might indicate that the market is losing its long-term memory or coherence, often a precursor to a regime shift (Latora & Marchiori, 2001).

The primary objective of this research is to construct and validate a hybrid ARIMAX-NVG forecasting model. Unlike a standard ARIMA model that relies solely on endogenous lags, the ARIMAX framework allows for the inclusion of external covariates (Box et al., 2015; Hyndman & Athanasopoulos, 2021). Here, the exogenous variables are not traditional macroeconomic indicators (like GDP or interest rates), but the complex network measures derived from the price series itself.

This report is structured to provide an exhaustive analysis of this methodology:

- **Section 2 (Materials and Methods)** details the extensive WTI dataset (1990-2025), the mathematical formulation of the NVG algorithm, the specific definitions of the spectral and centrality measures used, and the specification of the ARIMAX model.
- **Section 3 (Results)** presents the empirical findings, including the statistical significance of specific topological features (such as Harmonic Centrality and Efficiency) and the sign and magnitude of their regression coefficients.
- **Section 4 (Conclusions)** synthesizes the implications of these findings, discussing how “structural” information translates into “predictive” gain and offering recommendations for future applications in energy risk management.

By integrating the transparency of econometrics with the structural nuance of network science, this report aims to provide a sophisticated tool for navigating the turbulent waters of the global energy market.

Materials and Methods

The empirical basis of this study is the daily spot price of WTI crude oil, widely regarded as the benchmark for global energy pricing. The data is sourced from Federal Reserve Economic Data (FRED). The dataset spans a comprehensive 35-year period from May 23, 1990 to October 30, 2025. This interval is deliberately chosen to encompass a wide variety of market regimes:

- The Great Moderation (1990s): A period of relative stability punctuated by the Asian Financial Crisis (Bernanke, 2004).
- Asian Financial Crisis (late 1990s): a major global financial disturbance affecting commodity demand expectations.
- The Global Financial Crisis (2008-2009): The collapse of Lehman Brothers and the subsequent demand shock.
- Shale Revolution (2010-2014): structural supply-side change driven by U.S. tight oil growth.
- The COVID-19 Pandemic (2020): The unprecedented demand destruction and negative pricing anomaly.
- The Geopolitical Era (2022-now): The impacts of the Russia-Ukraine conflict and subsequent supply chain realignments.

To ensure rigorous out-of-sample validation, the data is split into a Training Set (spanning from 1992 to roughly 2020) and a Testing Set (spanning from 2020 to 2025). The inclusion of the post-2020 period in the testing set is critical, as it challenges the model to perform during one of the most volatile periods in history.

Target Variable Formulation: The raw price series P_t is non-stationary and unsuitable for direct modeling. Consequently, we focus on forecasting 7-day forward returns, a relevant horizon for short-to-medium term risk management. The simple h -step forward return $R_{t,h}$ for $h = 7$ days is calculated as:

$$R_{t,h} = \frac{P_{t+h} - P_t}{P_t} \quad (1)$$

However, financial returns exhibit volatility clustering (heteroscedasticity). To stabilize the variance and facilitate the comparison of returns across different volatility regimes, we employ a standardization procedure using a sliding window. For a window size $w = 50$ days, the standardized return $r_{t,h}$ is defined as:

$$r_{t,h} = \frac{R_{t,h} - \mu_{t,w}}{\sigma_{t,w}}, \quad (2)$$

where $\mu_{t,w}$ and $\sigma_{t,w}$ are the rolling mean and standard deviation of the returns over the past 50 days. This transformed variable $r_{t,h}$ serves as the endogenous target variable y_t in the ARIMAX framework.

The cornerstone of the feature extraction process is the mapping of the univariate time series into a graph space. We employ the NVG algorithm (*Lacasa et al., 2008*) due to its convexity properties and its ability to capture both local and global dependencies.

The mathematical definition is the following: Let the time series be represented as a set of N data points $\{(t_1, y_1), (t_2, y_2), \dots, (t_N, y_N)\}$, where t_i represents the time index and y_i represents the price value.

Two arbitrary data values (t_a, y_a) and (t_b, y_b) are connected by an undirected edge in the associated graph if and only if any other data point (t_c, y_c) placed between them ($t_a < t_c < t_b$) satisfies the visibility criterion:

$$y_c < y_b + (y_a - y_b) \frac{t_b - t_c}{t_b - t_a}. \quad (3)$$

This inequality implies that two time points are connected if a straight line joining their tops does not intersect any intermediate data bars. The criterion is essentially a convexity check. A “valley” in the time series allows distant peaks to see each other, creating long-range edges. A “peak” in the time series (a local maximum) acts as a hub, as it can see many other points (both past and future). Thus, the degree of a node k_i is directly correlated with the local magnitude and convexity of the price series.

Financial markets are non-stationary systems where structural properties evolve over time. Constructing a single graph for the entire 35-year history would obscure these temporal dynamics. Therefore, we implement a sliding window approach:

1. We utilize four distinct window lengths: $L \in \{25, 50, 75, 100\}$ days.
2. At each time step t , a subgraph is constructed using the price data in the interval $[t - L + 1, t]$.
3. For each window, the topology of the resulting graph is analyzed, and a vector of network metrics is computed. This results in a dynamic, time-varying stream of network indicators.

For each sliding window, we calculate a suite of complex network measures. These measures are selected to capture specific structural aspects of the market: connectivity, efficiency, centrality, and clustering. These serve as the X variables in the ARIMAX model.

Spectral measures. Spectral graph theory utilizes the eigenvalues of graph matrices to understand global properties like synchronization and robustness (*Chung, 1997*).

1. **Algebraic connectivity (λ_2):** Defined as the second-smallest eigenvalue of the graph Laplacian matrix (*Fiedler, 1973*). A value of $\lambda_2 > 0$ indicates a connected graph. The magnitude of λ_2 measures how difficult it is to decouple the graph. In a market context, high algebraic connectivity suggests a highly synchronized market where prices move in a unified manner, often observed during strong trends or systemic crashes.
2. **Spectral radius (R):** The largest eigenvalue of the adjacency matrix. It is strictly related to the dynamic range of the process (*van Mieghem, 2011*).
3. **Spectral gap ($\Delta\lambda$):** The difference between the largest and second-largest eigenvalues. It controls the speed of convergence to equilibrium in dynamic processes (like random walks) on the graph. A large gap implies the market absorbs information rapidly (*Chung, 1997*).
4. **Natural connectivity (N_c):** defined as $\ln(N^{-1} \sum e^{\lambda_i})$. It measures the “robustness” of the network, quantifying the redundancy of routes between nodes (*Wu et al., 2010*).
5. **Graph energy $E(G)$:** The sum of absolute values of eigenvalues. A holistic measure of structural complexity (*Gutman, 1978*).

Centrality and Efficiency Measures. These metrics identify the “importance” of specific days and the efficiency of information transmission.

1. **Global efficiency (E_{glob}):**

$$E_{glob} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}, \quad (4)$$

where d_{ij} is the shortest path length between nodes i and j (*Latora & Marchiori, 2001*). High global efficiency in an NVG implies that most time points are visible to each other (short path lengths). This occurs in “flat” or “concave” market structures where historical prices are relevant to the present. A drop in efficiency often signals a regime shift where the past becomes disconnected from the present.

2. **Global harmonic centrality (GH_c):**

$$GH_c = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i} \frac{1}{d_{ij}}. \quad (5)$$

Unlike standard Closeness Centrality, Harmonic Centrality handles infinite distances (disconnected components) by taking the reciprocal of the distance (where $1/\infty = 0$) (*Rochat, 2009*). While NVGs of continuous series are usually connected, this measure is more robust to “long tail” structures. High Harmonic Centrality suggests that a specific time window is dominated by a few central “hubs” (extreme price events) that connect the entire window.

3. **Betweenness Centrality (B):** Measures the fraction of shortest paths passing through a node. High betweenness nodes act as “bridges” between different market regimes (*Freeman, 1977*).
4. **Maximum Degree (D_{max}):** The highest number of connections for a single node in the window. Identifies the most significant local extremum (peak or valley) in that timeframe (*Lacasa et al., 2008*).

Clustering and Density Measures.

1. **Clustering Coefficients (C_3, C_4):** C_3 measures the prevalence of triangles (transitivity), while C_4 measures squares. High clustering is associated with regular, deterministic signals. A decrease in clustering often indicates an increase in randomness or noise (*Watts & Strogatz, 1998*).
2. **Assortativity (r):** The Pearson correlation coefficient of degrees between connected nodes (*Newman, 2002*).
 - a. Assortative ($r > 0$): Hubs connect to hubs.
 - b. Disassortative ($r < 0$): Hubs connect to low-degree nodes. Financial networks frequently show disassortative mixing, where extreme events (hubs) are surrounded by smaller fluctuations.

The ARIMAX Model Specification. The predictive engine is an ARIMAX model, which extends the univariate ARIMA by linearly adding exogenous covariates. The model for the standardized return y_t is given by:

$$y_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \epsilon_{t-j} + \sum_{m=1}^M \beta_m X_{m,t} + \epsilon_t, \quad (6)$$

where ϕ_i captures the momentum or memory of the returns themselves, θ_j captures the persistence of past shock (error) terms, $X_{m,t}$ represents the complex network indicators, and β_m quantifies the predictive impact of the network topology on future returns.

Results

We analyze the topological evolution of the market network, identify the statistically significant network predictors, and evaluate the model's forecasting performance during the critical testing period of 2020-2025.

The transformation of the WTI time series into visibility graphs reveals distinct topological signatures corresponding to different market phases.

During the 2003-2008 supercycle, the visibility graphs exhibited high global efficiency and regular clustering. The steady rise in prices meant that each new high was “visible” to many previous highs, creating a dense, interconnected structure. During the 2008 crisis and the 2020 COVID-19 crash, the network topology underwent a phase transition. We observed a sharp spike in maximum degree (as the crash created a prominent “valley” visible from many points) and a divergence in assortativity. The algebraic connectivity often rises prior to these events, signaling a fragmentation of the market structure before the actual price collapse.

These observations validate the hypothesis that the shape of the price history changes fundamentally during different regimes, providing a signal that is distinct from simple price volatility.

The regression analysis of the ARIMAX model identified a specific subset of network measures that possess high predictive power for 7-day forward returns.

Table 1 presents the top 10 statistically significant features ($p < 0.05$) derived from the training process.

Table 1. Statistically significant network features in the ARIMAX model.

Feature Name	Window Size (Days)	Lag	Coefficient (β)
Global Harmonic Centrality	25	t	-1.825×10^{11}
Global Efficiency	25	t	$+1.825 \times 10^{11}$
Global Harmonic Centrality	50	t	$+1.247 \times 10^{11}$
Global Efficiency	50	t	-1.247×10^{11}
Global Harmonic Centrality	75	t	-7.224×10^{10}
Global Efficiency	75	t	$+7.224 \times 10^{10}$
Global Harmonic Centrality	100	t	$+4.726 \times 10^{10}$
Global Efficiency	100	t	-4.726×10^{10}
Global Harmonic Centrality	25	$t-1$	$+1.563 \times 10^{11}$
Global Harmonic Centrality	25	$t-2$	-4.442×10^{11}

A striking pattern emerges in the 25-day window (short term). Global efficiency has a large positive coefficient, while global harmonic centrality has a large negative coefficient.

High global efficiency implies a network where information flows easily and path lengths are short. In the context of NVG, this often corresponds to a coherent trend where past prices support the current level. The positive coefficient suggests that such a structure predicts positive future returns – momentum is sustained.

High harmonic centrality implies the presence of dominant hubs (extreme values) that make the graph highly centralized. A negative coefficient suggests that when the local window becomes too centralized (e.g., dependent on a single price spike), the market is fragile and likely to correct downwards.

The significance of lagged variables (centrality at $t-1$ and $t-2$) indicates that the topological information is not just instantaneous but has a lingering effect. The extremely large negative coefficient for global harmonic centrality at window 25 and time lag $t-2$ (-4.442×10^{11}) suggests a strong mean-reversion effect: if the market structure was highly centralized two days ago, a sharp negative correction is highly probable today.

The model was rigorously tested on the out-of-sample period (2020-2025), covering the post-pandemic recovery and the geopolitical instability of the Russia-Ukraine war. The performance metrics are summarized in Table 2.

Table 2. Test Set Error Metrics (Standardized Returns).

Feature Name	Window Size (Days)
Root Mean Square Error	1.71
Mean Absolute Error	1.35
Mean Squared Error	2.92

Conclusions

This research report has detailed the development, implementation, and evaluation of a hybrid forecasting system for crude oil prices, merging the distinct disciplines of econometrics and complex network science. By treating the time series of WTI crude oil as a complex evolving network, we have demonstrated that the topological structure of the market contains valuable predictive information that eludes traditional linear analysis.

Changes in the geometric structure of the visibility graph – measured through efficiency, centrality, and spectral properties – often precede significant price movements. The visibility graph acts as a “structural X-ray” of the market, revealing fragility (e.g., high centralization) that is not apparent in simple price plots. The ARIMAX-NVG model leverages the best of both worlds: the statistical rigor and mean-reversion properties of ARIMA, and the non-linear, structural sensitivity of network science. The alternating signs of coefficients across window sizes (25 vs. 50 days) confirm that energy markets are not monolithic. They operate on multiple timescales simultaneously, with short-term speculative flows often opposing medium-term fundamental trends. The model effectively disentangles these conflicting signals.

The success of this methodology challenges the Strong Form of the Efficient Market Hypothesis (EMH). If historical price structures can predict future returns, then the market is not a random walk (*Fama, 1970; Samuelson, 1965*). Instead, it supports the Fractal Market Hypothesis (FMH), which posits that markets are made up of heterogeneous agents with different investment horizons, and that instability arises when the liquidity provided by one time-horizon fails (*Peters, 1994*).

For energy traders and risk managers, this research offers a tangible edge. The complex network indicators – particularly global efficiency and harmonic centrality – can be integrated into algorithmic trading systems as “filters” or “alpha signals”. A sharp divergence in these metrics could serve as an early warning system for volatility spikes, prompting defensive hedging strategies.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

Funding

The article was prepared within the framework of the state-funded research topic “Transformation of the financial ecosystem in the post-war recovery of Ukraine on the basis of resilience and sustainable development” (state registration number 0125U000541).

Authors contribution

Conceptualization, A.B. and V.S.; methodology, A.B., V.S., V.R., and M.S.; software, A.B.; validation, A.B., V.S., V.R., M.S., and T.P.; formal analysis, A.B. and M.S.; resources, V.S. and T.P.; data analysis, A.B.; visualization, A.B. and V.R.; supervision, V.S.; project administration, A.B., V.S.; funding acquisition, A.B.. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

References

- Álvarez-Ramírez, J., Ibarra-Valdez, C., & Soriano, A. (2002). Multifractal Hurst analysis of crude oil prices. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 313(3–4), 651–670. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)00985-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00985-8)
- Bielinskyi, A., Soloviev, V., Matviychuk, A., Solovieva, V., Kmytiuk, T., & Velykoivanenko, H. (2026). Early warning signs: Evaluating permutation entropy metrics for stock market crashes. In *Studies in systems, decision and control* (pp. 353–369). https://doi.org/10.1007/978-3-031-97529-5_21
- Bielinskyi, A., Soloviev, V., Matviychuk, A., Solovieva, V., Kmytiuk, T., Velykoivanenko, H., & Tuzhykov, A. (2024). Modeling and identifying states of irreversibility in Energy-Related markets. In *Lecture notes on data engineering and communications technologies* (pp. 243–256). https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_18
- Bielinskyi, A., Soloviev, V., Solovieva, V., Matviychuk, A., & Semerikov, S. (2023a). The analysis of Multifractal Cross-Correlation connectedness between Bitcoin and the stock market. In *Lecture notes on data engineering and communications technologies* (pp. 323–345). https://doi.org/10.1007/978-3-031-35467-0_21
- Bielinskyi, A., Soloviev, V., Solovieva, V., Matviychuk, A., Hushko, S., & Velykoivanenko, H. (2023b). Stock market crashes as phase transitions. In *Communications in computer and information science* (pp. 203–214). https://doi.org/10.1007/978-3-031-48325-7_15
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). Wiley.
- Chung, F. R. K. (1997). *Spectral graph theory*. American Mathematical Society.
- Eckmann, J.-P., Kamphorst, S. O., Ruelle, D., & Ciliberto, S. (1986). Liapunov exponents from time series. *Physical Review A*, 34(6), 4971–4979. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.34.4971>
- Fama, E. F. (1970). Efficient capital markets: A review of theory and empirical work. *The Journal of Finance*, 25(2), 383–417. <https://doi.org/10.2307/2325486>
- Fiedler, M. (1973). Algebraic connectivity of graphs. *Czechoslovak Mathematical Journal*, 23(2), 298–305.
- Freeman, L. C. (1977). A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 40(1), 35–41. <https://doi.org/10.2307/3033543>
- Gutman, I. (1978). *The energy of a graph*. Berichte der Mathematisch-Statistischen Sektion im Forschungszentrum Graz, 103, 1–22.
- Hamilton, J. D. (1994). *Time series analysis*. Princeton University Press.
- Hamilton, J. D. (2009). *Causes and consequences of the oil shock of 2007–08* (NBER Working Paper No. 15002). <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2583456>
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and practice* (3rd ed.). OTexts.
- International Energy Agency. (2023, February 23). *Where things stand in the global energy crisis one year on*. IEA.
- Kilian, L. (2009). Not all oil price shocks are alike: Disentangling demand and supply shocks in the crude oil market. *American Economic Review*, 99(3), 1053–1069. <https://doi.org/10.1257/aer.99.3.1053>

- Lacasa, L., Luque, B., Ballesteros, F., Luque, J., & Nuño, J. C. (2008). From time series to complex networks: The visibility graph. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(13), 4972–4975. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709247105>
- Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical Review Letters*, 87(19), 198701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.198701>
- Mantegna, R. N., & Stanley, H. E. (2000). *An introduction to econophysics: Correlations and complexity in finance*. Cambridge University Press.
- Newman, M. E. J. (2002). Assortative mixing in networks. *Physical Review Letters*, 89(20), 208701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.208701>
- Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An introduction*. Oxford University Press.
- Nobel Prize Outreach. (2021, October 5). *Press release: The Nobel Prize in Physics 2021*.
- Nobel Prize Outreach. (2024, October 8). *Press release: The Nobel Prize in Physics 2024*.
- Peters, E. E. (1994). *Fractal market analysis: Applying chaos theory to investment and economics*. John Wiley & Sons.
- Rochat, Y. (2009). *Closeness centrality extended to unconnected graphs: The harmonic centrality index*. Applications of Social Network Analysis (ASNA).
- Samuelson, P. A. (1965). Proof that properly anticipated prices fluctuate randomly. *Industrial Management Review*, 6(2), 41–49.
- Smith, J. L. (2017). *The price elasticity of U.S. shale oil reserves* (EIA Working Paper). U.S. Energy Information Administration.
- Taleb, N. N. (2007). *The black swan: The impact of the highly improbable*. Random House.
- U.S. Energy Information Administration. (2020, April 27). Low liquidity and limited available storage pushed WTI crude oil futures prices below zero. *Today in Energy*.
- van Mieghem, P. (2011). *Graph spectra for complex networks*. Cambridge University Press.
- Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of “small-world” networks. *Nature*, 393(6684), 440–442. <https://doi.org/10.1038/30918>
- World Energy Council. (2022). *World Energy Trilemma Index 2022*.
- Wu, J., Barahona, M., Tan, Y.-J., & Deng, H.-Z. (2010). Natural connectivity of complex networks. *Chinese Physics Letters*, 27(7), 078902. <https://doi.org/10.1088/0256-307x/27/7/078902>



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

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

JEL: L61

DOI: 10.62911/ete.2025.03.02.06

Investigation of the Influence of Alkali Metal Compounds on the Durability of the Grate Bar Field of Conveyor Machines During Iron Ore Pellet Firing

Citation:

Panchenko H., Ivanov A., Suslo N., Huk Y. (2025). Investigation of the Influence of Alkali Metal Compounds on the Durability of the Grate Bar Field of Conveyor Machines During Iron Ore Pellet Firing. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol.3 No.2 (2025), 66–77. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.06>

Hanna Panchenko

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

e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua

 *ORCID ID: 0000-0001-7565-0380*

Andrii Ivanov

Deputy Head of the Pelletizing Plant, PrJSC "Central Iron Ore Enrichment Works", Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: andrey.ivanov@metinvestholding.com

Nataliia Suslo

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

e-mail: suslo_nv@duet.edu.ua

 *ORCID ID: 0000-0001-9280-6316*

Yelyzaveta Huk

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

e-mail: huk_ys@duet.edu.ua

 *ORCID iD: 0000-0002-8866-9467*

Abstract: This investigation analyzes the influence of alkali metal compounds introduced into the firing process through the bentonite binder contained in iron ore pellets on the durability of grate bar assemblies in conveyor-type induration machines. During pellet firing, sodium- and potassium-bearing components inherent to montmorillonitic bentonites transform into reactive forms and interact at high temperatures with the grate bar material. In the presence of chromium in the steel, a complex oxide scale develops at the metal–oxide interface, incorporating low-melting chromate phases. These phases significantly reduce the protective capacity of the oxide film, promote intense scale spalling, and accelerate high-temperature chemical erosion, ultimately resulting in rapid and catastrophic grate bar degradation. To evaluate the degradation mechanisms, laboratory tests were carried out on samples of cast steel 40Kh24N12SL, which were oxidized and exposed to sodium-containing components at 1070 °C for six hours. Scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy revealed the formation of multilayer oxide scales enriched in sodium and chromium and the presence of reaction products characteristic of chromates, confirming the intensification of corrosion processes in the presence of alkali metals. The obtained results clarify the origins of severe grate bar wear under pellet induration conditions when bentonite is used as the binder. Since the alkali metal content is defined by the mineralogical nature of bentonite and is technologically necessary for achieving adequate pellet strength, its reduction is not feasible. Therefore, mitigating the destructive effect of alkali metals must rely on selecting more corrosion-resistant alloys for grate bars and optimizing the temperature–oxidation parameters of the firing process.

Keywords: alkali metals; sodium compounds; pellet firing; grate bar field; high-temperature corrosion; chromates; ferrates; bentonite binder; conveyor induration machine

Received: 11/12/2025

Accepted: 15/12/2025



JEL: L61

Investigation of the Influence of Alkali Metal Compounds on the Durability of the Grate Bar Field of Conveyor Machines During Iron Ore Pellet Firing

Hanna Panchenko

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

e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7565-0380

Andrii Ivanov

Deputy Head of the Pelletizing Plant, PrJSC "Central Iron Ore Enrichment Works", Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: andrey.ivanov@metinvestholding.com

Nataliia Suslo

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

e-mail: suslo_nv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-9280-6316

Yelyzaveta Huk

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

e-mail: huk_ys@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8866-9467

Abstract: This investigation analyzes the influence of alkali metal compounds introduced into the firing process through the bentonite binder contained in iron ore pellets on the durability of grate bar assemblies in conveyor-type induration machines. During pellet firing, sodium- and potassium-bearing components inherent to montmorillonitic bentonites transform into reactive forms and interact at high temperatures with the grate bar material. In the presence of chromium in the steel, a complex oxide scale develops at the metal–oxide interface, incorporating low-melting chromate phases. These phases significantly reduce the protective capacity of the oxide film, promote intense scale spalling, and accelerate high-temperature chemical erosion, ultimately resulting in rapid and catastrophic grate bar degradation. To evaluate the degradation mechanisms, laboratory tests were carried out on samples of cast steel 40Kh24N12SL, which were oxidized and exposed to sodium-containing components at 1070 °C for six hours. Scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy revealed the formation of multilayer oxide scales enriched in sodium and chromium and the presence of reaction products characteristic of chromates, confirming the intensification of corrosion processes in the presence of alkali metals. The obtained results clarify the origins of severe grate bar wear under pellet induration conditions when bentonite is used as the binder. Since the alkali metal content is defined by the mineralogical nature of bentonite and is technologically necessary for achieving adequate pellet strength, its reduction is not feasible. Therefore, mitigating the destructive effect of alkali metals must rely on selecting more corrosion-resistant alloys for grate bars and optimizing the temperature–oxidation parameters of the firing process.

Keywords: alkali metals; sodium compounds; pellet firing; grate bar field; high-temperature corrosion; chromates; ferrates; bentonite binder; conveyor induration machine.

Дослідження впливу сполук лужних металів на стійкість колосникового поля конвеєрних машин при обпаленні залізорудних окатишів

Ганна Панченко

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

e-mail: panchenko_hm@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7565-0380

Андрій Іванов

заступник начальника фабрики огрудкування

ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат», Кривий Ріг, Україна

Наталія Сусло

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

e-mail: suslo_nv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-9280-6316

Єлизавета Гук

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

e-mail: huk_ys@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-8866-9467

Анотація: У роботі досліджено вплив сполук лужних металів, що надходять у процес обпалення разом із бентонітовою зв'язкою у складі залізорудних окатишів, на стійкість колосникового поля конвеєрних машин. Під час обпалення натрієві та калієві компоненти, присутні в монтморилонітових бентонітах, переходять у реакційно здатні форми та за високих температур взаємодіють із матеріалом колосника. За наявності в сталі хрому в зоні контакту утворюється окалина складної структури, у якій фіксуються легкоплавкі хромати. Такі фазові утворення різко знижують захисні властивості оксидної плівки, спричиняючи її інтенсивне відшаровування та стрімке прогресування хімічної ерозії, що призводить до передчасного руйнування колосників. Для оцінювання механізмів деградації проведено лабораторні дослідження зразків литої сталі 40Х24Н12СЛ, які окиснювали та піддавали дії натрієвмісних компонентів за температури 1070 °С упродовж шести годин. Методами електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу встановлено формування багатошарової окалини з підвищеним умістом натрію та хрому й наявністю фаз, характерних для хроматів, що підтверджує інтенсифікацію корозійних процесів у присутності лужних металів.

Отримані результати дозволяють пояснити природу катастрофічного зношування колосникового поля за умов обпалення окатишів із бентонітовою зв'язкою. Оскільки вміст лужних металів визначається мінералогічною природою бентоніту та є технологічно необхідним для забезпечення міцності окатишів, мінімізація їхнього впливу має ґрунтуватися на виборі більш корозійностійких матеріалів колосників і коригуванні температурно-окиснювальних параметрів обпалення.

Ключові слова: лужні метали; натрієві сполуки; обпалення окатишів; колосникове поле; високотемпературна корозія; хромати; феррати; бентонітова зв'язка; конвеєрна обпалювальна машина.

Вступ (Introduction)

Обпалення залізорудних окатишів на конвеєрній машині Lurgi ОК-552 супроводжується високотемпературною хімічною ерозією литих сталевих колосників. Унаслідок цього їхня експлуатаційна стійкість у середньому не перевищує шести місяців. Заміна колосників

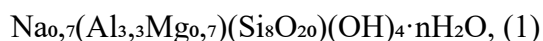
призводить до простоїв обладнання, зниження продуктивності машини та, відповідно, до зростання питомої витрати колосників і підвищення собівартості окатишів.

Встановлено, що основними причинами виходу з ладу колосників є: механічне зношування; хімічна ерозія під дією матеріалу окатишів і газового середовища; температурний режим роботи обпалювальної машини; низька якість литих колосників та невідповідність хімічного складу сталі встановленим вимогам (*Panchenko et al, 2008*).

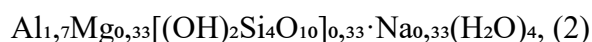
Сирі офлюсовані окатиші діаметром 12–15 мм, що надходять на окиснювальний обпал, складаються з дрібних фракцій магнетитового концентрату, вапна та зв'язувальної речовини, переважно бентоніту. Під час аналізу процесів хімічної ерозії колосників із хромонікелевої сталі необхідно враховувати хімічний склад і мінералогічну природу бентоніту. Термін «бентоніт» (bentonite) є загальноприйнятою в США назвою глини, що утворилася внаслідок конседиментаційного вивітрювання. Основним мінеральним компонентом бентоніту є монтморилоніт (*Strübel et al, 1991*)

Слід підкреслити, що при одному й тому ж загальному найменуванні мінералу монтморилоніту його різновиди істотно відрізняються за хімічним складом і будовою. Межі складів монтморилонітової групи змінюються від чисто алюмосилікатних (тип А) до магнезіальних (тип Б). Серед обмінних катіонів найбільше значення мають іони лужних металів і кальцію. Іони магнію значно міцніше зв'язані в структурі у вигляді груп $[MgO_6]$, що заміщують $[AlO_6]$ в октаедричних шарах пірофілітового типу. У мінералогічній різновидності, що називається бейделітом – $(Na, Ca_{0,5})_{0,33}Al_2(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ – як кінцевим членом групи монтморилонітів, кількість лужних елементів є досить значною (*Strübel et al, 1991*).

За даними К. Фрея (*Frye, 1983*), монтморилоніт має лужну реакцію (рН 6,2–9,0) та наступний формульний склад:



У «Мінералогічному словнику» Г. Штрубеля та З. Х. Циммера (*Strübel et al, 1991*) цей мінерал (тип Б) подається формулою:



Таким чином, наведені вище дані свідчать про суттєві відмінності між різновидами монтморилоніту за вмістом лужних компонентів (зокрема іонів натрію), що актуалізує необхідність дослідження впливу хімічного складу бентоніту разом із температурно-окиснювальними параметрами обпалення окатишів на хімічну ерозію колосників.

У разі використання бентоніту, який містить достатню кількість мінеральних форм Na_2O і K_2O , для отримання механічно міцних окатишів натрієва добавка (сода) як «активатор» зазвичай не вводиться або додається у незначній кількості. Якщо ж застосовуються монтморилонітові глини з низьким вмістом Na_2O та K_2O , але з підвищеним вмістом CaO (наприклад, Дашуківського родовища), передбачається введення соди у кількості 5–7%. Це може посилювати хімічну ерозію колосників під час обпалення окатишів через зниження захисних властивостей окалини.

Окиснювальний обпал магнетитових окатишів здійснюється за температурно-газовим режимом, розробленим на ПрАТ «ПівніГЗК» для обпалювальних машин Lurgi ОК-552. Температурно-часові режими сушіння сирих окатишів практично виключають види руйнування, що проявляються утворенням тріщин на поверхні або високотемпературним вибуховим руйнуванням, пов'язаним з розвитком об'ємно-напруженого стану внаслідок великих градієнтів вологості та температури (*Pokhyl et al, 2003*)

При окиснювально-зміцнювальному обпалі офлюсованих окатишів перебігає низка важливих окисно-відновних процесів, серед яких екзотермічне окиснення магнетиту до гематиту:



Термокінетика окиснення та дифузійний транспорт іонів під час обпалення були предметом багатьох досліджень (Едстрем та ін.). Максимальна ступінь окиснення спостерігається у діапазоні 900–1000 °С [4]. За вищих температур ступінь окиснення магнетиту зменшується через термічну дисоціацію гематиту згідно з реакцією:



Е. Ф. Вегман та ін. (*Pokhyl et al, 2003*) зазначають, що при вмісті кисню у газовому теплоносії 10–15% температура дисоціації гематиту становить 1360–1370 °С.

Під час обпалення окатишів відбувається твердофазна хімічна взаємодія між Fe_3O_4 і SiO_2 (як із концентрату, так і з бентоніту) з утворенням силікатного розплаву, який бере участь у формуванні зміцнювальної фази. Лужний силікатний розплав може бути значно активнішим щодо хімічної ерозії металу колосників порівняно з розплавом, утвореним за участю кремнезему магнетитового концентрату та магнієвмісного монтморилоніту. З огляду на те, що різновиди бентонітів суттєво відрізняються за вмістом натрію та калію, а додаткове введення натрієвмісних активаторів у технологію офлюсованих окатишів може змінювати характер реакцій у зоні високотемпературного обпалення, виникає потреба у поглибленому вивченні впливу сполук лужних металів на інтенсивність хімічної ерозії та стійкість колосникового поля конвеєрних машин. Саме це визначає актуальність даного дослідження та формує його мету – встановити роль лужних компонентів в процесі обпалення окатишів у механізмах деградації колосників.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Для дослідження хімічної ерозії колосникового поля були використані зразки, виготовлені з жароміцної литої сталі марки 40Х24Н12СЛ, що застосовується для виготовлення колосників конвеєрних обпалювальних машин. Перед проведенням основного експерименту зразки піддавали попередньому окисненню газовим пальником з метою формування оксидної плівки, характерної для реальних умов роботи колосників у зоні високотемпературного обпалення.

Для моделювання дії лужних компонентів бентонітової зв'язки поверхню окиснених зразків обробляли натрієвмісним реагентом (Na_2CO_3), що відтворює хімічний вплив лужних оксидів, присутніх у складі монтморилонітового бентоніту. Подальше термооброблення проводили у муфельній печі при температурі 1070 °С протягом 6 годин. Вибраний температурний режим відповідає зоні максимального термохімічного навантаження на колосникове поле конвеєрної машини типу Lurgi ОК-552 та забезпечує інтенсивний розвиток окисно-лужних взаємодій.

Аналіз структури та фазового складу окатишів, матричної зони та оксидних шарів зразків колосників здійснювали методами електронної мікроскопії та рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА). Дослідження проводили на сканувальному електронному мікроскопі JSM-6360LA із застосуванням режимів точкового аналізу, картування та лінійного елементного сканування. Прискорююча напруга для вивчення мікроструктури окатишів становила 15 кВ, зразків колосників – 20 кВ, що дозволяє коректно визначати концентрацію хрому, заліза та натрію у складних оксидних утвореннях (*Goldstein et al, 2018*)

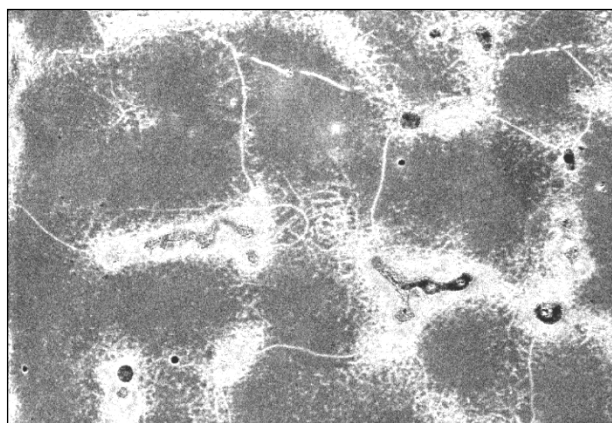
Металографічну підготовку зразків колосників виконували шляхом електрополірування у суміші метанолу, сірчаної кислоти та гліцерину з подальшим хімічним травленням реактивом Марбля для виявлення мікроструктурних особливостей зони хімічної ерозії.

Результати (Results)

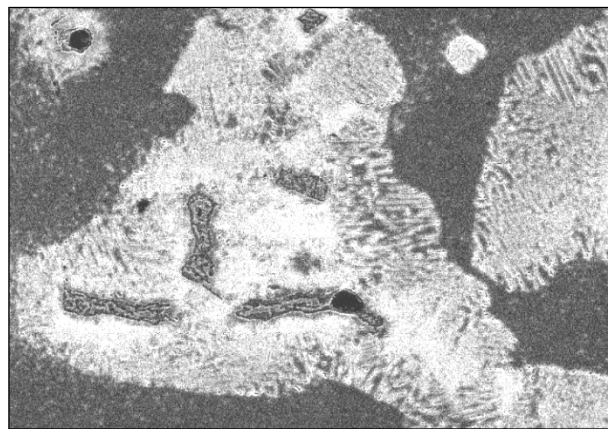
Дослідження мікроструктури зразків колосників і поверхневих шарів окатишів дозволяють оцінити взаємодію матеріалів у зоні високотемпературного обпалення та виявити особливості формування ерозійних процесів. Аналіз мікроструктур і хімічного складу окалини

та матриці металу дає змогу встановити локалізацію фазових виділень і характер перерозподілу лужних компонентів із бентоніту. Отримані дані є основою для пояснення механізму утворення агресивних умов для колосникового поля.

На рис. 1 представлена мікроструктура серцевини зразка сталі 40Х24Н12СЛ при збільшеннях. Уздовж меж зерен чітко спостерігаються темноколірні виділення, які за морфологією та характером локалізації ідентифікуються як сульфідна фаза, що узгоджується з даними про типові міжзеренні включення у жароміцних хромонікелевих сталях (*ASM International, 1994*). При збільшенні 3500 (рис. 2) добре видно відшаровування окалини після обпалення зразка в присутності натрійвмісного компонента. Трансформація зони металу, що прилягає до реакційної області, проявляється у зменшенні кількості темних сульфідних виділень.

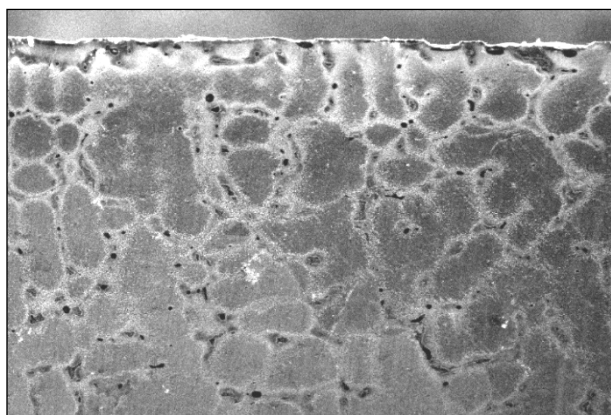


x500

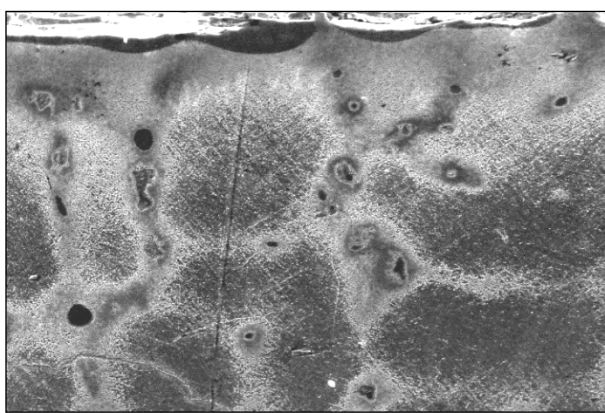


x1000

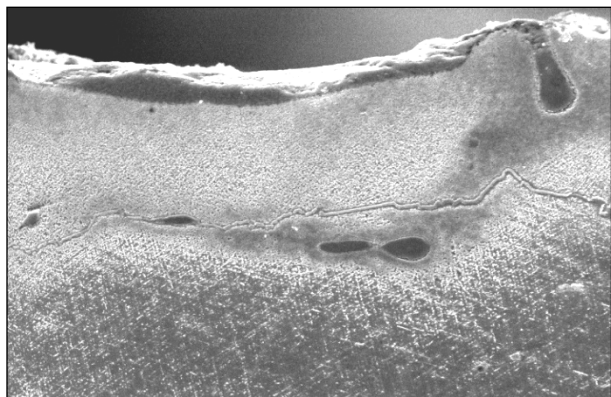
Рисунок 1. Мікроструктура литого зразка сталі 40Х24Н12СЛ при різних збільшеннях; травлення електролітичне у реактиві метанол – 60 мл, H_2SO_4 – 20 мл та гліцерин – 10 мл.



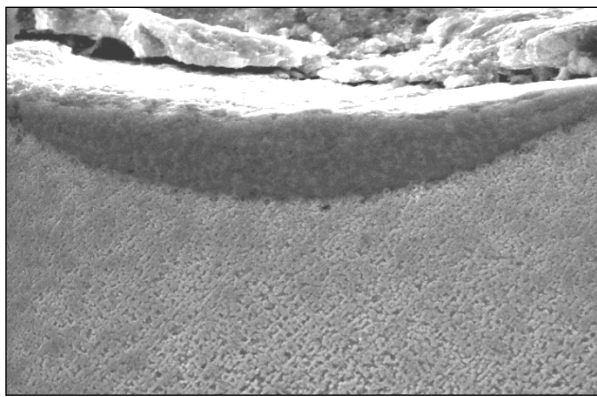
x150



x500



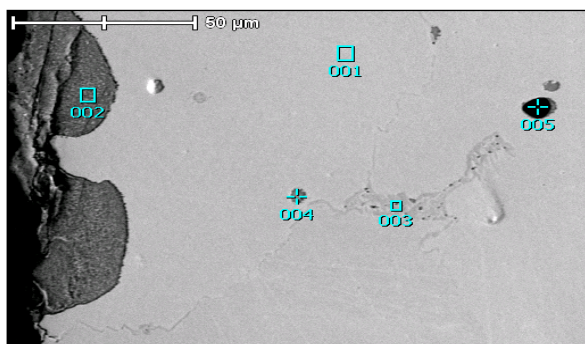
x1000



x3500

Рисунок 2. Мікроструктура реакційної зони зразка сталі 40Х24Н12СЛ при різних збільшеннях; травлення хімічне у реактиві Марбля.

Спектрограми РСМА матричної фази наведено на рис. 3 (рамка – точка 001) та рис. 4 (хрестик – точка 006). Хімічний склад матриці відповідає марочному складу сталі. Прикордонні виділення темної фази, відповідно до результатів точок 001 (рис. 3), та 008–011 (рис. 4), являють собою сульфід CrS стехіометричного складу (38,1% S та 61,9% Cr), частково ізоморфно заміщений атомами Mn та Fe, що відповідає відомим даним про фазовий склад сульфідних виділень у сталях аналогічного класу (*Edström, (2008); Lyakishev& Gasik, (2020)*).



x800 a

№ ділянки	C	O	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Всього, %
001	0	0	0	0.37	0	0	20.26	0	66.96	12.42	100
002	0	11.02	0	0.45	0.15	0	39.21	0	30.54	18.63	100
003	3.43	0.22	0	0.21	3.13	0	63.44	0	26.73	2.83	100
004	1.42	0	0	0	32.97	0	36.18	29.43	0	0	100
005	0	26.44	4.76	42.68	0.52	1.99	11.73	8.82	3.05	0	100

Рисунок 3. Результати РСМА фаз у реакційній зоні зразка сталі 40X24H12СЛ: а – точки аналізу, позначені рамками; б – приблизний склад за результатами РСМА. Шліф у стані після електрополірування



x1200 a

№ ділянки	O	Na	Si	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Всього, %
006	0	0	0.35	0	21.35	0	65.72	12.58	100
007	9.91	0.53	0.18	6.41	72.74	2.82	7.41	0	100
008	0	0	0	33.57	61.84	2.9	1.69	0	100
009	0	0	0	34.64	54.45	9.02	1.89	0	100
010	0	0.88	0.4	1.45	21.32	0	64.46	11.5	100
011	0	0	0	33.18	59.79	5.23	1.8	0	100
012	4.12	0	0	20.8	57.92	3.48	11.69	1.98	100

б

Рисунок 4. Результати РСМА фаз у серцевині зразка сталі 40X24H12СЛ: а – точки аналізу, позначені рамками; б – приблизний хімічний склад за результатами РСМА. Шліф у стані після електрополірування

Особливу увагу привертає окалина, що сформувалась на поверхні після обпалення зразка в присутності натрієвмісного реагенту (рис. 3, рамка – точка 002). Вона має виразну шарувату будову.

Елементні карти (рис. 5) демонструють чіткий перерозподіл компонентів: внутрішній шар окалини збагачений Si, Na та Cr, тоді як вміст Fe у цій зоні значно знижений. Гетерогенність структури простежується за нерівномірним розподілом Ni. Концентрація натрію у внутрішній частині окалини вказує на інтенсивне протікання реакцій Na_2O з Cr_2O_3 , що узгоджується з термодинамічними передумовами утворення хроматів низької температури плавлення (Pokhyl et al, 2003).

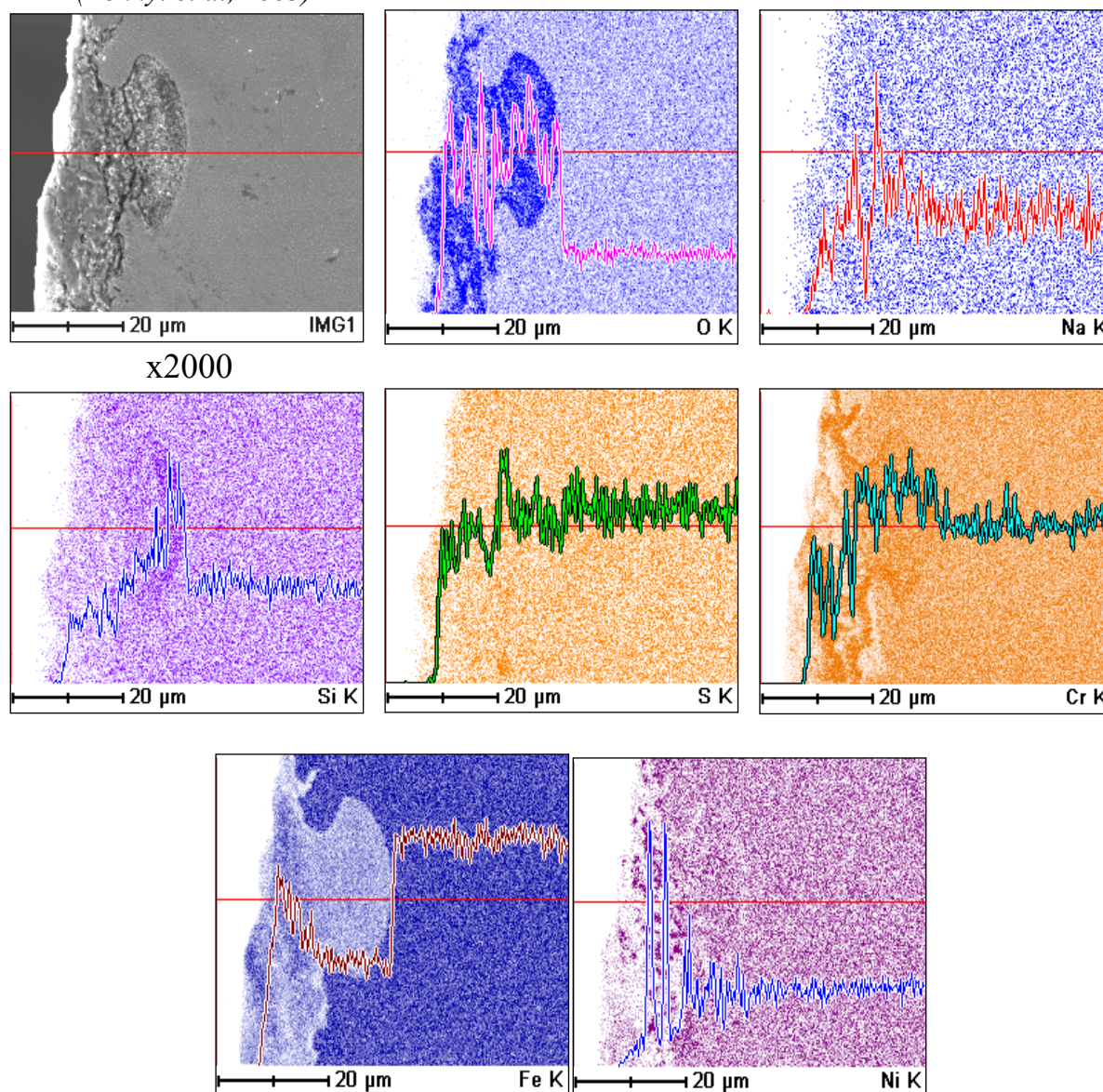
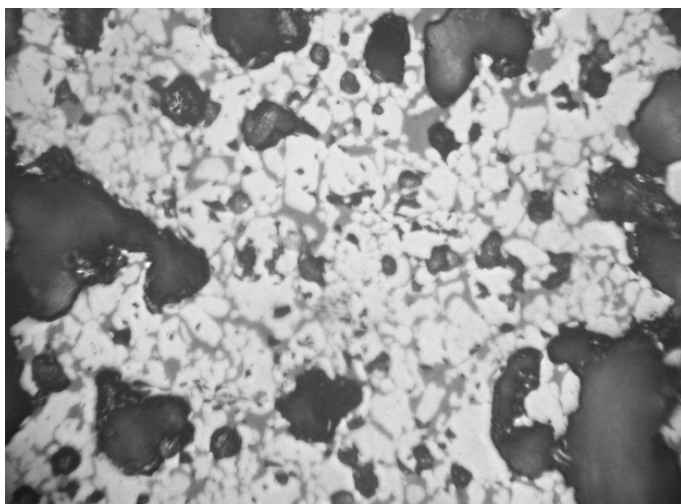


Рисунок 5. Результати РСМА сталі 40X24N12СЛ у режимі картування шляхом накладання спектрограм уздовж лінії сканування реакційної зони зразка. Шліф у стані після електрополірування.

Для коректного пояснення цих результатів необхідно врахувати будову обпалюваних окатишів та поведінку бентонітової зв'язки під час термооброблення.

Як видно на рис. 6, поверхнева зона обпаленого окатиша має складну шарувату структуру, що складається зі спечених зерен залізних мінералів та бентонітової зв'язки, розташованої переважно в міжзернових проміжках між частками магнетиту. Окремі зерна обрамлені частково відновленими окислами заліза. При збільшенні $\times 100$ бентонітова зв'язка виглядає як відносно гомогенна фаза.



×100

Рисунок 6. Мікроструктура обпаленого окатиша (оптична металографія)

Хімічний склад бентоніту, що використовувався в якості зв'язуючого, характеризується високим вмістом кремнезему та значними концентраціями оксидів лужних металів (мас. %):

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
48,82	16,64	4,28	2,73	0,55	0,065	0,041
S _{заг}	F _{сзаг}	Fe ₂ O ₃	FeO _{заг}	Na ₂ O	K ₂ O	CO
0,022	6,0	8,14	0,39	0,58	0,94	3,08

Наявність 0,58% Na₂O і 0,94% K₂O є критичною з точки зору високотемпературної взаємодії з поверхнею колосників. У структурі монтморилоніту (головної мінеральної фази бентоніту), ці елементи перебувають у міжшаровому просторі та легко переходять у реакційноздатні форми при температурах 900–1200 °С.

Під час обпалення відбуваються глибокі структурні й фазові перетворення бентонітових компонентів, що простежується на рисунку 7. Хімічний склад бентонітової зв'язки змінюється наступним чином, %:

Na ₂ O	Mg ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO
0,45	1,72	1,1	43,56	0,71	16,47	35,98

Тобто, під час обпалення окатишів, оксиди Na₂O та K₂O, що містяться у складі бентонітової зв'язки, не видаляються, а активно беруть участь у формуванні нових мінеральних утворень, що підвищують механічні властивості обпалюваних окатишів.

Розподіл елементів між рудним зерном і бентонітовою зв'язкою обпаленого окатиша при скануванні кожного елемента в режимі кольорового картування з нанесенням спектра випромінювання елементів наведено на рис. 8. При збільшенні ×3500 видно, що бентонітова зв'язка має гетерогенну будову, що зумовлено взаємодією поверхні зерна рудного мінералу з компонентами бентоніту, що добре ілюструється на карті заліза. Характерною є плавна зміна інтенсивності спектра Fe на межі «руда – зв'язка»: від максимального вмісту заліза у рудному зерні до мінімального у бентонітовому прошарку. Це підтверджує активну участь бентонітових компонентів у формуванні поверхневої структури окатиша під час сушіння та обпалення. Таким чином, лужні компоненти, які надходять до зони контакту «окатиш – колосник» разом із бентонітом, не є випадковими домішками, а є закономірним результатом високої початкової концентрації Na₂O та K₂O у складі бентоніту й їхньої безпосередньої участі в термохімічних перетвореннях.

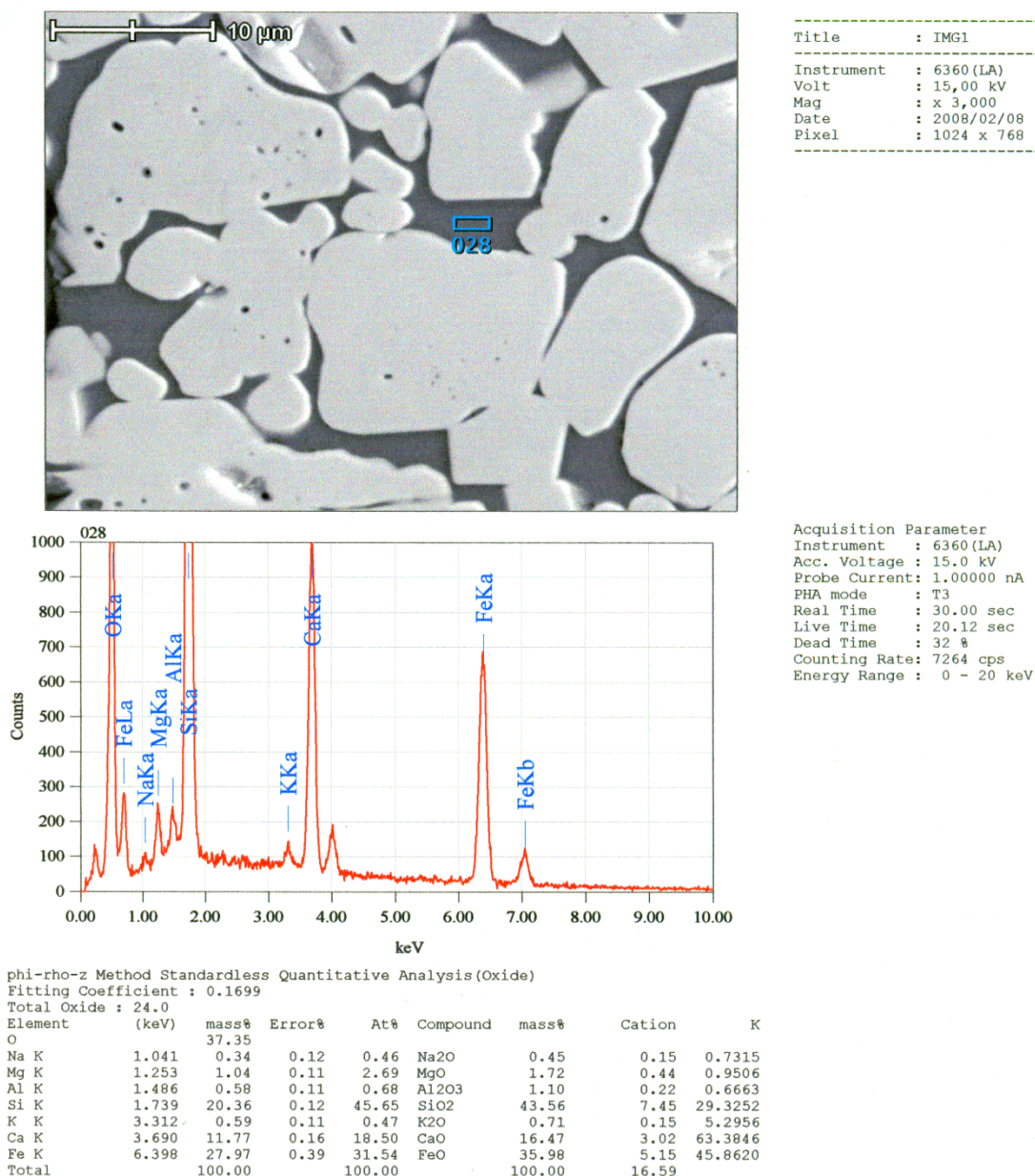
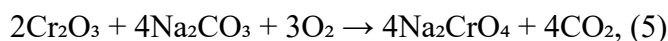


Рисунок 7. Мікроструктура зони окатиша по середині радіуса

В умовах високотемпературного обпалення окатишів (1000–1200 °C), коли поверхня колосника покрита окалиною зі значним вмістом Cr_2O_3 , лужні оксиди, що переходять у реакційно активні форми в результаті дегідроксиляції монтморилоніту, вступають у взаємодію з оксидами хрому та заліза. У таких системах $\text{Na}_2\text{O}(\text{K}_2\text{O})\text{--Cr--O}$ формуються термодинамічно стійкі хімічні сполуки — монохромати Na_2CrO_4 та K_2CrO_4 , які є солями хромової кислоти та здатні утворюватися в окиснювальному середовищі при температурах, характерних для зони високотемпературної дії обпалювальної машини [9,10]. Хромати лужних металів характеризуються низькою температурою плавлення ($\text{Na}_2\text{CrO}_4 \approx 790$ °C; $\text{K}_2\text{CrO}_4 \approx 968$ °C), високою розчинністю та схильністю до проникнення в дефекти оксидної плівки, що істотно знижує її адгезію до металевої основи [10].

Утворення цих фаз відбувається за реакціями типу:



де проміжною стадією є формування NaCrO_2 , здатного легко окиснюватися до Na_2CrO_4 у потоках гарячого газового середовища. Важливою є також участь ферратів натрію Na_2FeO_4 ,

які можуть виникати при взаємодії натрійвмісних компонентів із Fe_2O_3 окалини. Ферати діють як каталізatori окиснення $\text{Cr(III)} \rightarrow \text{Cr(VI)}$, прискорюючи формування хроматів і сприяючи локальному руйнуванню захисного шару окалини (Zheng et al, 2006).

Мікроструктурні дослідження колосникової сталі після взаємодії з натрійвмісним середовищем демонструють відповідність цьому механізму: внутрішній шар окалини збагачується Na і Cr, показує ознаки розрідження та часткового переплавлення, втрачає структурну цілісність, що проявляється у відшаровуванні (рис. 2). Ці явища повністю корелюють з властивостями хроматів — легкоплавких та високодисперсних фаз, здатних порушувати стабільність оксидного шару на поверхні хромонікелевих сталей.

Таким чином, ключовою ланкою у механізмі деградації є те, що бентоніт, збагачений Na_2O і K_2O , створює в поверхневій зоні окатиша лужно-силікатну реакційну оболонку, з якої лужні катіони активно дифундують до поверхні колосника. Саме їхня взаємодія з Cr_2O_3 окалини приводить до утворення легкоплавких хроматів, що провокують втрату адгезії оксидної плівки, відшаровування окалини та інтенсивну хімічну ерозію металу.

Результати експериментальних досліджень підтверджують фізико-хімічний механізм деградації: лужні оксиди, що походять із бентоніту у складі окатишів, взаємодіють з оксидами хрому окалини сталі 40X24H12СЛ з утворенням легкоплавких хроматів, які істотно знижують ерозійну стійкість колосникових решіток. Це свідчить про ключову роль мінералогічного складу бентонітової зв'язки у формуванні агресивних умов для роботи колосникового поля конвеєрних обпалювальних машин.

Висновки (Conclusions)

1. Основною причиною деградації колосників конвеєрних обпалювальних машин є хімічна ерозія в зоні високотемпературного обпалення, яка значно посилюється під впливом лужних оксидів (Na_2O , K_2O) із бентонітової зв'язки окатишів.

2. Мінералогічний склад бентоніту, зокрема наявність монтморилоніту типу Б та бейделіту, визначає активність лужних катіонів у процесах взаємодії з Cr_2O_3 окалини на поверхні колосників.

3. Під час високотемпературного обпалення (1000–1200 °C) лужні оксиди утворюють легкоплавкі хромати Na_2CrO_4 і K_2CrO_4 , що знижує адгезію оксидної плівки та провокує відшаровування окалини, прискорюючи хімічну ерозію металу.

4. Експериментальні дані підтверджують, що концентрація Na_2O та K_2O у бентонітовій зв'язці прямо корелює з інтенсивністю ерозійного процесу, що підкреслює ключову роль мінералогічного складу бентоніту та лужних компонентів у формуванні агресивних умов для роботи колосникового поля.

5. Оскільки вплив лужних компонентів є критичним для механічних властивостей окатишів і їх повне виключення з технологічного процесу виробництва окатишів неможливе, виникає необхідність пошуку альтернативних методів підвищення стійкості колосників.

6. Подальше вивчення проблеми підвищення стійкості колосників до хімічної ерозії рекомендується розглядати в напрямках пошуку і застосування інших складів жароміцних і жаростійких сплавів, нанесення захисних покриттів або модифікацію окалини, а також контроль температурно-газового режиму обпалювальної машини.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація – П.Г. та І.А.; формальний аналіз І. А. І; Методологія – П. Г та І. А.; візуалізація – П. Г. та С. Н ; оригінальна чернетка – П. Г. та Г. Є.; перегляд і редагування – С. Н. та Г. Є. Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- ASM International. (1994). *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*. ASM International. ISBN 978-0871705037.
- Edström, H. (2008). High-temperature oxidation of Fe–Cr–Ni steels. *Materials Science and Technology*, 24(8), 969–976. <https://doi.org/10.1179/174328407X213917>
- Frye, K. (Ed.). (1983). *The Encyclopedia of Mineralogy*. New York, NY: Springer. <https://doi.org/10.1007/0-387-30720-6>
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2018). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
- Lyakishev, N. P., & Gasik, M. I. (2020). *Chromium: Metallurgy and Environmental Issues*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38903-4>
- Panchenko, A. N., Ivanov, A. S., Khmel, V. V., & Gribenko, M. G. (2008). *Fakty, opredelyayushchie rabotosposobnost' kolosnikov obzhigovykh konveyernykh mashin*. Naukovyi visnyk KUEITU. Novi tekhnolohii, (1(19)), 241–245.
- Pokhyl, P. H., Kotsarenko, N. Ya., & Kuts, V. P. (2003). *Metalurhiya chavunu*. Kyiv: Lybid'.
- Strübel, G., & Zimmer, S. H. (1991). *Lexikon der Minerale* (2nd expanded and corrected ed.). Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag. ISBN 3-432-92722-3.
- Wei, Y., La, P., Zheng, Y., Zhan, F., Yu, H., Yang, P., Zhu, M., Bai, Z., & Gao, Y. (2025). Review of Molten Salt Corrosion in Stainless Steels and Superalloys. *Crystals*, 15(3), 237. <https://doi.org/10.3390/cryst15030237>
- Zheng, S., Zhang, Y., Li, Z., Oi, T., Li, H., & Xu, H. (2006). Green metallurgical processing of chromite. *Hydrometallurgy*, 82(3–4), 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.014>



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

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

JEL: L640

DOI: 10.62911/ete.2025.03.02.07

Analytical studies of the operation of a vertically directed vibratory-magnetic separator

Citation:

Shved, S., Zaitsev, H., Henkulenko, S. & Shumylo, O. (2025). Analytical studies of the operation of a vertically directed vibratory-magnetic separator. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", Vol.3 No.2 (2025), 78–89, <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.07>

Serhii Shved

PhD, Assoc. Prof, 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: 0000-0002-0991-2343*

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 discusses a new design and operation of a vertically directed vibration-magnetic separator intended for the disposal of iron-containing waste from mining and metallurgical enterprises. The problem of recycling iron-containing waste in Ukraine is quite acute and consists of large volumes, outdated processing technologies and equipment, and negative environmental impact. Outdated recycling technologies lead to soil, water and air pollution, as well as the loss of valuable secondary resources. An effective solution to the problem requires the introduction of modern technologies and equipment for processing accumulated iron-containing waste. The aim of the work is to study the processing and disposal of iron-containing waste using a new vertically directed vibration-magnetic separator. The main methods used in the work were analytical studies and mathematical modelling of processes occurring in a vertically directed vibration-magnetic separator. As a result of the research, the main patterns of the process of enrichment of iron-containing materials were obtained for the proposed design of the vibration-magnetic separator, which allows selecting rational and effective parameters of the technical system under consideration. The research results can be used to develop modern and effective equipment for the enrichment of iron-bearing waste from mining and metallurgical enterprises.

Keywords: iron-bearing waste; slag; processing; vertical vibration-magnetic separator; working body; helicoid; vibration; magnetic field; productivity; vortex vibration field.

Received: 15/12/2025

Accepted: 19/12/2025



JEL: L640

Analytical studies of the operation of a vertically directed vibratory-magnetic separator

Serhii Shved

PhD, Assoc. Prof, 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: 0000-0002-0991-2343

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 discusses a new design and operation of a vertically directed vibration-magnetic separator intended for the disposal of iron-containing waste from mining and metallurgical enterprises. The problem of recycling iron-containing waste in Ukraine is quite acute and consists of large volumes, outdated processing technologies and equipment, and negative environmental impact. Outdated recycling technologies lead to soil, water and air pollution, as well as the loss of valuable secondary resources. An effective solution to the problem requires the introduction of modern technologies and equipment for processing accumulated iron-containing waste. The aim of the work is to study the processing and disposal of iron-containing waste using a new vertically directed vibration-magnetic separator. The main methods used in the work were analytical studies and mathematical modelling of processes occurring in a vertically directed vibration-magnetic separator. As a result of the research, the main patterns of the process of enrichment of iron-containing materials were obtained for the proposed design of the vibration-magnetic separator, which allows selecting rational and effective parameters of the technical system under consideration. The research results can be used to develop modern and effective equipment for the enrichment of iron-bearing waste from mining and metallurgical enterprises.

Keywords: iron-bearing waste; slag; processing; vertical vibration-magnetic separator; working body; helicoid; vibration; magnetic field; productivity; vortex vibration field.

Аналітичні дослідження роботи вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії

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 Шуило

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 розглянуто нову конструктивну схему та роботу вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії призначеного для утилізації залізовмісних відходів гірничо-металургійних підприємств. Проблема утилізації залізовмісних відходів в Україні є досить актуальною і полягає в їх великих обсягах, застарілих технологій та обладнання з переробки і негативному впливі на довкілля. Застарілі технології утилізації призводить до забруднення ґрунту, води та повітря, а також до втрати цінних вторинних ресурсів. Ефективне вирішення проблеми вимагає впровадження сучасних технологій та обладнання з переробки накопичених залізовмісних відходів. Метою роботи є дослідження переробки і утилізації залізовмісних відходів з використанням нового вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії. Основними методами, використаними в роботі, були аналітичні дослідження та математичне моделювання процесів, що відбуваються у вібраційно-магнітному сепараторі вертикально направленої дії. В результаті досліджень для запропонованої конструкції вібраційно-магнітного сепаратора отримані основні закономірності процесу збагачення залізовмісних матеріалів, що дозволяє вибрати раціональні та ефективні параметри розглядаємої технічної системи. Результати досліджень можуть бути використані для розробки сучасного та ефективного обладнання з збагачення залізовмісних відходів гірничо-металургійних підприємств.

Ключові слова: залізовмісні відходи; шлаки; переробка; вертикальний вібраційно-магнітний сепаратор; робочий орган; гелікоїд; вібрація; магнітне поле; продуктивність; вихрове вібраційне поле.

Вступ (Introduction)

Відомо що до залізовмісних відходів гірничо-металургійних підприємств належать різноманітні матеріали, які утворюються в процесі видобутку, збагачення та переробки залізних руд, до яких відносяться: відходи видобутку і збагачення; шлаки; пилоподібні відходи та шлами; окалина; металобрухт і неліквіди; відпрацьовані футеровочні матеріали.

Основну частину залізовмісних відходів гірничо-металургійних підприємств складають відходи видобутку і збагачення залізних руд та шлаки доменного і сталеплавильного виробництв (*Hubina, et al., 2023*). Так на прикладі Криворізького басейну відходи видобутку та збагачення залізної руди складає більш ніж 96% від усієї промисловості регіону (*Bondar, et al., 2020*).

Проведений аналіз в роботах (*Hubina, et al., 2023, Kyiashko, et al., 2020, Bondar, et al., 2020*) показує, що річне утворення шлаків доменного і сталеплавильного виробництв становить 4,4 млн тонн та 2,5 млн тонн відповідно. На теперішній час підприємствами України накопичено 240 млн тонн шлаків. Ці відходи займають значні території (*Salii, et al., 2020*), та негативно впливають на екосистему навколо їх (*Bondar, et al., 2020*), а також є джерелом

вторинної сировини, яка є стратегічним ресурсом гірничо-металургійного комплексу України та потребують їх утилізації (Hubina, et al., 2023).

Одним з розвинутих способів вилучення залізорудної складової з відвалів гірничо-металургійного комплексу є гравітаційний спосіб розділення частинок, який використовує різноманітні сегрегаційні процеси і зв'язане з ними необхідне обладнання в повітряному і водному середовищах (Kravchenko, et al., 2006, Kravchenko, et al., 2018, Biletskyi, et al., 2020, Oliinyk, et al., 2023, Pilov, 2021). Але така велика кількість запропонованих способів, а відповідно, і обладнання до них, ускладнює з одного боку, вибір найкращого для тих чи інших умов збагачення залізорудної частини матеріалу, з іншого – не призводить до розширення знань про його сегрегацію при впливі на нього комплексного вібраційно-гравітаційного та магнітного силового поля, які крім інших, є найбільш екологічно небезпечними.

На сьогодні для переробки доменних та сталеплавильних шлаків використовують застарілі технологічні схеми і обладнання, які не в змозі підвищувати продуктивність робіт і не дозволяють їх повну утилізацію. Слід відзначити, що крім цього, використані способи і засоби з утилізації шлаків недостатньо ефективні при переробці відвальних шлаків різних металургійних виробництв – доменного та сталеплавильного, які об'єднані в загальні відвали і мають різні фізико-механічні властивості (Bondar, et al., 2020). Як показує практика, основним засобом у всіх випадках вилучення заліза є навісна електромагнітна шайба або електромагнітний барабан стрічкового конвеєра, які не дозволяють суттєво підвищувати продуктивність ділянок утилізації металургійного шлаку.

Таким чином, з огляду проведеного аналізу, можна стверджувати, що робота, спрямована на дослідження по встановленню закономірностей процесу магнітно-вібраційно-гравітаційного збагачення залізовмісних відходів, що дозволяють з'ясувати раціональні параметри технічної системи та розробку відповідного обладнання для покращення вилучення залізовмісної складової з відходів гірничо-металургійного комплексу, не завдаючи шкоди екологічному довкіл्लю, є на даний час актуальною задачею.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Для встановлення закономірностей процесу вібраційно-гравітаційного магнітного збагачення залізовмісних відходів та вибору раціональних параметрів технічної системи запропонована модель рис. 1 вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії (далі сепаратор), яка є модифікацією раніше розробленого кафедрою інжинірингу з галузевого машинобудування Навчально-наукового інституту Державного університету економіки і технологій магнітного сепаратора (Zaitsev, et al., 2024), і включає: завантажувальний лоток 1, корпус 2, спіральний робочий орган 3, віброзбуджувачі 4, регульовані електромагніти 5, гумові пружні елементи 6, перевантажувач 7, приймальні бункера для залізовмісного 9 та немагнітного 8 матеріалів.

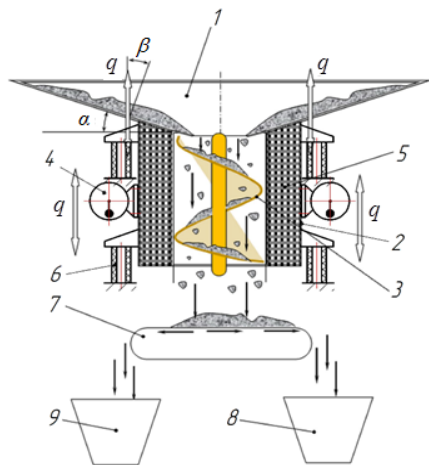


Рисунок 1. Модель вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії
Джерело: розроблено авторами

Функціонування сепаратора визначається двома послідовними технологічними етапами. Завантаження залізозмісного матеріалу (далі матеріал) здійснюється в лоток 1, виконаний з немагнітного матеріалу. Кут α між робочою поверхнею лотка і горизонтом значно менше, ніж кут природного укосу матеріалу що подається. Транспортування матеріалу по поверхні лотка 1 до спірального робочого органу 3 здійснюється під дією вібрації віброзбуджувачів 4 з прискоренням q . Далі матеріал потрапляє на сталеву спіральну поверхню робочого органу 3 з вертикальною віссю симетрії і включеним регульованим електромагнітом 5, який розташований в корпусі 2 сепаратора. В процесі руху матеріалу по спіральній поверхні робочого органу 3 до розвантажувального вікна за рахунок магнітного поля магнітна частина матеріалу прилипає до його поверхні та внутрішній поверхні корпусу 2, а немагнітна частина продовжує рухатись далі і пройшовши через розвантажувальне вікно, випадає на перевантажувач 7, який завантажує його в бункер немагнітного матеріалу 8.

Потім (див. рис. 1) подача матеріалу до завантажувального лотка 1 припиняється, а віброзбуджувачі 4 продовжують працювати до моменту поки уся немагнітна частина матеріалу з спірального робочого органу 3 вивантажиться через розвантажувальне вікно на перевантажувач 7 і завантажиться в бункер немагнітного матеріалу 8. Далі вимикаються електромагніти 5, а віброзбуджувачі 4 продовжують працювати, магнітна частина матеріалу відлипає від стінок корпусу 2 та поверхні робочого органу 3 і під дією вібраційно-гравітаційних сил рухається до розвантажувального вікна корпусу, де зсипається на перевантажувач 7, який в режимі реверсу подає і завантажує його в бункер магнітного матеріалу 9.

Кожен з етапів процесу вібраційно-магнітного збагачення накладає свої вимоги до конструктивного виконання сепаратора. Розглянемо ці вимоги нижче.

Результати (Results)

На першому етапі вібраційно-магнітної обробки матеріалу необхідно забезпечити задану продуктивність сепаратору за вихідним живленням. Це означає, що при заданій вібрації поверхня завантажувального лотка, повинна мати певний кут нахилу. Чим більший цей кут тим більшою буде продуктивність сепаратора, однак його зміна в більшу сторону обмежена технологічною умовою: за відсутності вібрації сировина на конічний поверхні повинна бути гарантовано нерухомою відносно розвантажувального отвору лотка (повинна зависнути). Але це означає, що

$$\alpha < \operatorname{tg}(k), (1)$$

де k – коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу.

Якщо відомий кут природного укосу для сухого матеріалу α_0 , то вираз (1), що відповідає зазначеній технологічній умові, можна звести до вигляду:

$$\alpha < \alpha_0, (2)$$

Похила поверхня завантажувального лотка зумовлює зростання висоти шару матеріалу в міру його просування до центру лотка. У зв'язку з цим необхідно враховувати умову відкритості розвантажувального отвору (повністю заповнений завантажувальний отвір навіть за умови вібраційної дії може викликати непрохідність робочого органу). Таким чином, необхідно встановити взаємозв'язок між кутом нахилу робочої поверхні завантажувального лотка і діаметром його розвантажувального отвору. На рис. 2 показана розрахункова схема, за якою встановлюється такий взаємозв'язок.

Об'ємна продуктивність сепаратора за вихідним матеріалом відповідно до прийнятої розрахункової схеми визначається наступною залежністю:

$$V = s \cdot v = s \cdot \frac{dl}{dt} \approx \text{const}, (3)$$

де V – об'ємна продуктивність сепаратора за вихідним матеріалом, м³/с;

s – площа поперечного кільцевого перетину потоку матеріалу в заданому місці i в радіальному напрямку, м²;

v – швидкість потоку матеріалу в заданому місці в радіальному напрямку, м/с;

dl – елементарне приростання шляху в радіальному напрямку за елементарно малий проміжок часу dt , м.

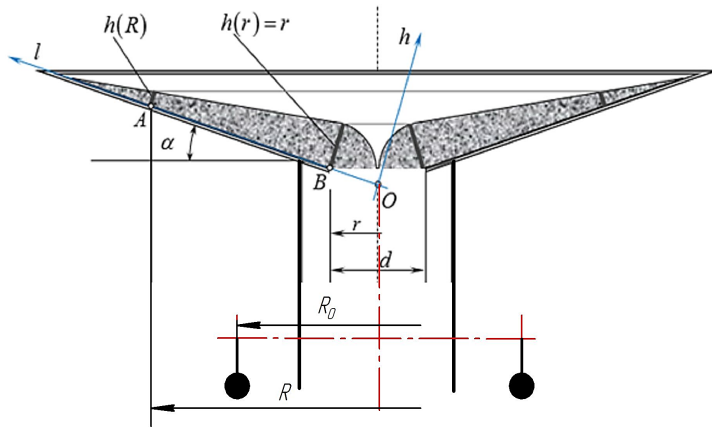


Рисунок 2. До розрахунку взаємозв'язку між кутом нахилу робочої поверхні завантажувального лотка і діаметром його розвантажувального отвору
Джерело: розроблено авторами

При цьому маємо на увазі, що при товщині шару матеріалу h , м

$$s = 2\pi l \cdot h = \frac{2\pi}{\cos \alpha} \cdot rh;$$

$$dl = \frac{dr}{\cos \alpha}.$$

Після підстановки цих залежностей в (3) отримуємо рівняння

$$V \frac{(\cos \alpha)^2}{2\pi \cdot v} = rh \text{ звідки } h(r) = \frac{(\cos \alpha)^2}{2\pi} \frac{V}{v \cdot r}, \quad (4)$$

Враховуючи, що при повністю присипаному розвантажувальному отворі висота шару матеріалу біля нього може дорівнювати радіусу отвору, тобто $h(r) = r$, отримуємо необхідне конструктивне співвідношення для радіуса розвантажувального отвору лотка:

$$r > \cos \alpha \cdot \sqrt{\frac{V}{2\pi v}}, \quad (5)$$

Або для діаметра цього отвору d , м:

$$d > \cos \alpha \cdot \sqrt{\frac{2V}{\pi v}}, \quad (6)$$

Якщо прийняти розвантажувальний отвір завантаженим наполовину просвіту, тоді

$$d = \cos \alpha \cdot \sqrt{\frac{V}{2\pi v}}, \quad (7)$$

Залежність висоти шару матеріалу при сталій продуктивності 0,1 м³/с від радіуса розвантажувального отвору лотка при його швидкості 0,1, 0,2 і 0,3 м/с представлена на рис. 4.

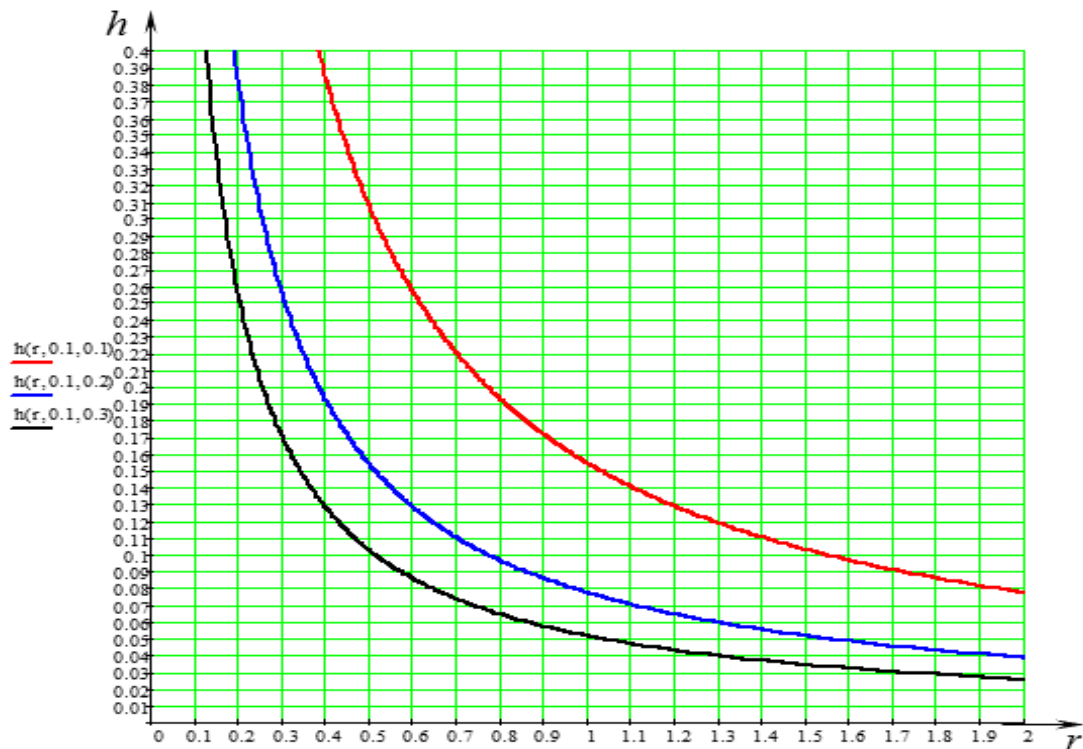


Рисунок 3. Залежність висоти шару матеріалу при сталій продуктивності $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ від радіуса розвантажувального отвору лотка при його швидкості 0,1, 0,2 і 0,3 м/с
Джерело: розроблено авторами

Із графіка видно, що висота шару матеріалу збільшується при зменшенні радіусу розвантажувального отвору лотка та швидкості транспортуемого матеріалу. Ця залежність дозволяє вибрати розміри розвантажувального отвору лотка, робочого органу сепаратора, забезпечуючи необхідну його продуктивність без зависання матеріалу в зоні його завантаження.

Після того, як матеріал провалюється в розвантажувальний отвір завантажувального лотка, він потрапляє в зону магнітно-вібраційної обробки (рис. 4). Тут на частинки матеріалу здійснюється дія трьох активних силових факторів: сили тяжіння $\bar{G}$; магнітної сили $\bar{F}$ і вібраційної сили інерції $\bar{Q}$. Оскільки в цій зоні відбувається накопичення частинок, що містять залізо, необхідна присутність магнітної поверхні великої площі, яка викликає появу дотичної $\bar{T}$ і нормальної $\bar{N}$ реактивних сил.

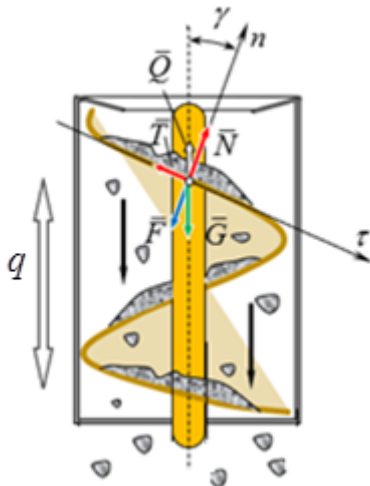


Рисунок 4. Рух матеріалу по робочому органу на етапі магнітно-вібраційної обробки
Джерело: розроблено авторами

Магнітна поверхня повинна пропускати повз себе весь матеріал і в той же час мати максимально можливу протяжність. Такій умові відповідає гелікоїдальна (спіральна) форма з необхідним кутом нахилу γ і кількістю витків.

Мінімальна кількість витків гелікоїда визначається умовою зустрічі всього потоку матеріалу з його поверхнею – це один повний виток.

У свою чергу, кут нахилу γ і характерні діаметри гелікоїда визначаються умовою гарантованого проходження потоку матеріалу через його робочий простір.

Магнітну силу F (Н) враховуємо залежно від індукції магнітного поля

$$F = \lambda B, (8)$$

де B – індукція магнітного поля в робочому просторі, Тл;

λ – коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструктивного виконання пристрою і струму в котушці електромагніту, А·м, визначається експериментально.

Приймаємо масу частинки пропорційною кубу її розміру. Тоді максимальна величина вібраційної сили інерції Q буде:

$$Q = \rho \delta^3 \cdot A \omega^2, (9)$$

де ρ – середня щільність частинок матеріалу, кг/м³;

δ – середня величина поперечного розміру частинки, м;

ω – кругова частота коливань робочого органу на поверхні гелікоїда, с⁻¹;

A – амплітуда коливань робочого органу в області гелікоїда, м.

Дотична реактивна сила T , (Н) існує в результаті дії сили тертя між поверхнею гелікоїда і частинками матеріалу та безпосередньо між частинками у верхніх шарах примагніченого до поверхні гелікоїда матеріалу. Максимальна величина сили тертя визначається законом Кулона, тобто

$$T = k \cdot N, (10)$$

де k – експериментально визначений коефіцієнт тертя спокою між частинками нашарованого на гелікоїді матеріалу;

N (Н) – величина нормальної сили реакції, яка дорівнює величині сили, що притискає частинку до поверхні гелікоїда.

Система рівнянь граничної рівноваги для частинки, примагніченої до шару матеріалу відповідно до прийнятої розрахункової схеми вздовж дотичної та нормальної осей, відповідно матиме вигляд:

$$\begin{cases} G \cdot \sin \gamma - T - Q \cdot \sin \gamma = 0 \\ N - F - G \cdot \cos \gamma + Q \cdot \cos \gamma = 0 \end{cases}, (11)$$

Нормальна реакція опори може бути виділена з кожного рівняння відповідно до підстановки (10):

$$N = F + (G - Q) \cdot \cos \gamma, (12)$$

$$N = (G - Q) \cdot \frac{\sin \gamma}{k}, (13)$$

Прирівнявши праві частини виразів, складаємо рівняння для визначення мінімального значення магнітної сили, достатньої для утримання частинки в заданих умовах:

$$(G - Q) \cdot \frac{\sin \gamma}{k} = F + (G - Q) \cdot \cos \gamma, (14)$$

звідки

$$F = (G - Q) \cdot \left(\frac{\sin \gamma}{k} - \cos \gamma \right), \quad (15)$$

Вираз (15) повинен бути додатним, тобто повинна дотримуватися наступна гранична умова для кута нахилу γ поверхні гелікоїда:

$$\operatorname{tg} \gamma > k \text{ або } \gamma > \operatorname{arctg}(k), \quad (16)$$

Місткість робочого органу по примагніченому до його поверхні магнітному матеріалу, тим більша, чим більша площа поверхні гелікоїда, тому максимальний об'єм магнітного матеріалу, який може знаходитися на поверхні робочого органу, визначається мінімальним кутом нахилу γ гелікоїда. Однак, чим менший кут нахилу гелікоїда, тим складнішим буде просування немагнітної частини матеріалу по шару примагніченого матеріалу, тому для полегшення такого руху необхідна наявність вібраційного впливу.

Також потрібно мати на увазі умову для безвідривного перебування частинки на шарі матеріалу, тобто умову позитивності нормальної реакції опори:

$$N > 0, \quad (17)$$

Скориставшись виразом (13), виконавши скорочення та перетворення, запишемо для визначення взаємозв'язку між прискореннями гравітаційного та вібраційного полів, кутом нахилу поверхні гелікоїда та коефіцієнтом тертя між ним та матеріалом:

$$(g - q) \cdot \frac{\sin \gamma}{k} > 0, \text{ звідки } q < g, \quad (18)$$

Таким чином величина вібраційного прискорення q на поверхні гелікоїда у вертикальному напрямку має бути менше прискорення вільного падіння g .

Ця умова не може бути виконана, якщо траєкторії вібраційного переміщення точок робочого органу вертикальні. Щоб виконати умову (16) і водночас забезпечити ефективну подачу матеріалу в завантажувальний лоток, необхідна наявність вихрового вібраційного поля, яке змодельоване і показане на рис. 5.

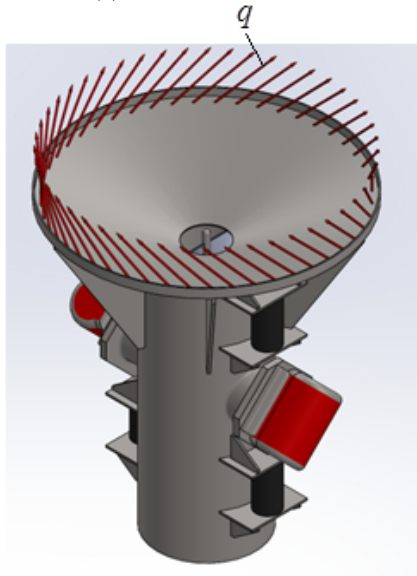


Рисунок 5. 3-D модель сепаратора з розташуванням його віброзбуджувачів для забезпечення вихрового вібраційного поля
Джерело: розроблено авторами

Уздовж вертикальної осі симетрії такого поля буде діяти інваріантний вектор мінімального вібраційного прискорення, який визначається:

$$q_{\min} = q_{\max} \cdot \cos \theta, (19)$$

де θ - кут нахилу вібраційної сили від вертикалі;

$q_{\max}$ – максимальне вібраційне прискорення.

Горизонтальна ж проекція вектору вібраційного прискорення $\tilde{q}$ не є інваріантною – вона буде залежати від радіального розташування точки A на поверхні завантажувального лотка відносно вертикальної осі симетрії вібраційного поля та радіусу розташування віброзбуджувачів відносно вертикальної осі симетрії сепаратора (див. рис. 3):

$$\tilde{q} = q_{\max} \cdot \frac{R}{R_0} \sin \theta, (20)$$

де R – поточний радіус досліджуваної точки A ;

R_0 – радіус розташування віброзбуджувачів відносно вертикальної осі симетрії сепаратора.

Використовуючи формулу (20) можна вибрати кут θ нахилу вібраційної сили від вертикалі при відомій максимальній величині вібраційного прискорення, що розвивається двома віброзбуджувачами в синхронному режимі роботи.

Межею першого етапу роботи сепаратора є переповнення камери робочого органу сепаратора примагніченим до його поверхні матеріалом. При цьому рух немагнітної частини матеріалу по його магнітній частині в робочому органі, стає ускладненим через критичне зменшення його просвіту.

Вивантаження магнітної частини матеріалу відбувається під дією сили тяжіння, реакції робочої поверхні гелікоїда та вібрацією, яка генерується двома самосинхронізуючими віброзбуджувачами. Коефіцієнт тертя k_2 між робочою поверхнею гелікоїда і матеріалом, що примагнітився до його поверхні визначається експериментально. Якщо кут нахилу робочої поверхні гелікоїда обрано з умови (16), в якій використовувався також експериментально визначений коефіцієнт тертя спокою k між частинками розташованими на гелікоїді матеріалу (частинка по шару частинок), то вивантаження магнітного матеріалу забезпечується. Тобто умова вивантаження магнітної частини матеріалу буде мати вигляд:

$$k_2 < k, (20)$$

Якщо вивантаження магнітної частини матеріалу з робочого органу ускладнено, наприклад, висока вологість матеріалу, розміри частинок матеріалу тощо, то для інтенсифікації процесу вивантаження, за допомогою частотного перетворювача, віброзбуджувачі включають в режим $q > g$.

Висновки (Conclusions)

Для збагачення залізовмісних відходів, запропонована конструкція вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії та виконано аналіз його роботи.

В запропонованому сепараторі об'єднані три найбільш розповсюджені методи збагачення залізовмісних відходів: магнітний, вібраційний та гравітаційний. Робочий орган сепаратора виконаний у формі гелікоїда (спіралі), розташованого вертикально, що значно збільшує довжину його робочої поверхні, це забезпечує більш тривале перебування матеріалу на ній і разом з комбінованим методом збагачення я підвищує продуктивність сепаратора і ефективність сепарації в порівнянні з іншими конструкціями сепараторів. Вертикальна конструкція запропонованого сепаратора не займає багато місця і добре впишеться в більшість технологічних схем з переробки залізовмісних відходів.

Встановлено взаємозв'язок між кутом нахилу робочої поверхні завантажувального лотка і діаметром його розвантажувального отвору.

Встановлено залежність висоти шару матеріалу при швидкості транспортуемого матеріалу 0,1, 0,2 і 0,3 м/с від радіуса розвантажувального отвору лотка, аналіз якої показав, що висота шару матеріалу збільшується при зменшенні радіусу розвантажувального отвору лотка та швидкості транспортуемого матеріалу. Ця залежність дозволяє вибрати розміри розвантажувального отвору лотка, робочого органу сепаратора, забезпечуючи необхідну його продуктивність без зависання матеріалу в зоні завантаження в робочий орган.

Проаналізовано рух матеріалу по робочому органу на етапі магнітно-вібраційної обробки. В результаті чого було встановлено взаємозв'язок між прискореннями гравітаційного та вібраційного полів, кутом нахилу поверхні гелікоїда та коефіцієнтом тертя між ним та матеріалом. Окрім цього встановлено, що при мінімальному куту нахилу γ гелікоїда для забезпечення просування немагнітної частини матеріалу по шару примагніченого матеріалу, необхідна наявність вібраційного впливу і для забезпечення безвідривного режиму величина вібраційного прискорення q на поверхні гелікоїда у вертикальному напрямку має бути менше прискорення вільного падіння g , та визначена умова при якій, цей кут γ був би більш коефіцієнту тертя спокою k між частинками нашарованого матеріалу, що забезпечує його ефективну подачу в завантажувальний лоток.

Дослідженнями встановлено, що вивантаження магнітної частини матеріалу відбувається під дією сили тяжіння, реакції робочої поверхні гелікоїда та вібрацією, яка генерується двома самосінхронізуючими віброзбуджувачами, коли коефіцієнт тертя k_2 між робочою поверхнею гелікоїда і матеріалом що примагнітився до його поверхні, менший за коефіцієнт тертя спокою k між частинками матеріалу, що оброблюється.

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, методика, програмне забезпечення, Ш.С; перевірка, аналіз отриманих даних, формальний аналіз, З. Г.; 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. (2020). *Osnovy tekhniky ta tekhnolohii zbahachennia korysnykh kopalyn*. Kyiv : Lira-K. Publishing. P. 634. <https://lira-k.com.ua/files/contents/12770.pdf?srsId=AfmBOoqk-83Lywlvxv2STQrLJbF7gnL26Gs4L6Ovr6m9IdH9eqH109D4q>
- Bondar, O.I., Ryzhenko, N.O., & Salii, I.V. (2020). Otsinka ymovirnykh vplyviv na dovkillia za zdiisnennia planu dii z realizatsii vykorystannia promyslovykh vidkhodiv u Kryvorizkomu promyslovomu rehioni. *Ekolohichni nauky: naukovo praktychnyi zhurnal*, 4(31), 82–91. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.12>
- Bondar, O.I., Ryzhenko, N.O., & Salii, I.V. (2020). Nakopychennia shlakiv metalurhiinykh pidpriemstv: Otsinka vplyvu na dovkillia ta ekolohichne obgruntuvannia povodzhennia. *Ekolohichni nauky: naukovo praktychnyi zhurnal*, 3(30), 83–91.

<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.14>

Bondar, O.I., Ryzhenko, N.O., & Salii, I.V. (2020). Otsinka ymovirnykh vplyviv na dovkillia za zdiisnennia planu dii z realizatsii vykorystannia promyslovykh vidkhodiv u Kryvorizkomu promyslovomu rehioni. *Ekolohichni nauky: naukovo praktychnyi zhurnal*, 4(31), 82–91.

<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.12>

Hubina, V.H., & Horlytskyi, B.O. (2023). Problema zalizovmisnykh vidkhodiv hirnychometaluriinoho kompleksu Ukrainy – systemnyi pidkhid. *Heokhimiia tekhnohenezu*, 17 (2009), 26–28

<https://journals.igns.kyiv.ua/index.php/geotech/article/view/308>

Kravchenko, V.P., Taternyia, E.V., & Lazarevskaia, Yu.A. (2018). Pererobka vidvalnykh metalurhiinykh shlakiv. *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*, (37), 15–21. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.37.2018.160221>

Kravchenko, V.P., Fentisov, I.M., Strutynskyi, V.N., & Cherkasin, O.V. (2006) Sposib pererobky vidvalnykh metalurhiinykh shlakiv. *Patent Ukrainy 18107*, Biul. № 10, P. 4.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/300229>

Kyashko, V.T., Salii, I.V., Yakovenko, L.O., & Malynovskyi, Yu.O. (2020). Perspektyvni napriamy utylizatsii vidkhodiv hirnycho-zbahachuvalnoho vyrobnytstva. *Ekolohichni nauky: naukovo praktychnyi zhurnal*, 4(31), 103–106. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.15>

Oliinyk, T.A., Rumnytskyi, D.O., & Skliar, L.V. (2023). Sehrehatsiia chastynok pry hravitatsiinii separatsii mineralnykh ahrehativ u vodnomu seredovyshchi. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, 56, 47–54. http://fs.knu.edu.ua/periodicals/mining_journal/vesnik_knu/56/11.pdf

Pilov P.I. *Hravitatsiini metody zbahachennia korysnykh kopalyn*. (2021). Dnipro: Natsionalnyi tekhnichniyi universytet Dniprovskia politekhnika. Publishing. P. 152.

<https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/8960e602-4984-40ab-9ea1-d66a81ec4078/content>

Salii, I.V., Ryzhenko, N.O., Zaselskyi, V.I., & Popolov, D.V. (2020). Doslidzhennia ta shliakhy polipshennia ekomonitorynhu v misti Kryvyi Rih. *Ekolohichni nauky: naukovo praktychnyi zhurnal*, 5(32), 16–22. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.5-32.2>

Zaitsev, H.L., Shved, S.V., Henkulenko, S.M., & Shumylo, O.S. (2024). Separator hravitatsiino-mahnitnoho rozdilennia. *Patent Ukrainy 157457*, Biul. № 42, P. 4.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1823481/>



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

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

JEL: C01, C15, C2

DOI: 10.62911/ete.2025.03.02.08

Polyhydric Alcohols as Promising Eco-Friendly Binders for Coal Blend Preparation in Coking Technology

Citation:

Shmeltser, K., Kormer, M., & Desna, N. (2025). Polyhydric Alcohols as Promising Eco-Friendly Binders for Coal Blend Preparation in Coking Technology. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", Vol.3 No.2 (2025), 90–100 <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.08>

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*

Maryna Kormer

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

e-mail: kormer@duet.edu.ua

 *ORCID iD: 0000-0002-6509-0794*

Natalia Desna

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

e-mail: desna@duet.edu.ua

 *ORCID ID: 0000-0003-0768-7813*

Abstract: The study addresses the problem of the deteriorating quality of the raw material base in the Ukrainian coking industry, which is primarily caused by the increasing proportion of low-caking, high-ash, and high-sulfur coal grades in the charge. This transformation in the composition of the feedstock adversely affects the thermotechnical parameters of the coking process, leading to uneven thermal decomposition of coal components and deteriorating the physico-mechanical properties of the resulting coke, thereby limiting its applicability in blast furnace operations. One of the promising approaches to correcting the technological characteristics of the coal charge is the application of polyvinyl alcohol (PVA) cryogels as a binding and structure-forming component during the partial briquetting of coal. The mechanisms of three-dimensional porous structure formation in PVA cryogels under cyclic freeze-thaw conditions are described, highlighting their water solubility, non-toxicity, excellent film-forming ability, and efficiency in stabilizing dispersed coal particles. Experimental studies are presented to determine the optimal PVA content, freezing regimes, and drying parameters of the briquettes. It has been established that the incorporation of 5–10% PVA ensures the formation of a robust cryogel matrix, which provides the briquettes with enhanced mechanical stability, reduces their brittleness, and prevents structural failure during transportation and charging into coking chambers. The study demonstrates that the use of PVA cryogels compensates for the deficit of high-caking coal grades, improves the homogeneity of the coal charge, intensifies the initial stages of carbonization, and ensures the production of coke with the required operational properties. The obtained results confirm the high efficiency of using PVA as an innovative tool for raw material modification under contemporary industrial and resource constraints, providing a viable strategy to optimize coke quality and overall process performance in modern coking operations.

Keywords: coal charge, charge quality, waste/by-products, briquetting, cryogels

Received: 12/12/2025

Accepted: 17/12/2025



JEL: JEL: L640, L710

Polyhydric Alcohols as Promising Eco-Friendly Binders for Coal Blend Preparation in Coking Technology

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

Maryna Kormer

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

e-mail: kormer@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-6509-0794

Natalia Desna

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

e-mail: desna@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-0768-7813

Abstract: The study addresses the problem of the deteriorating quality of the raw material base in the Ukrainian coking industry, which is primarily caused by the increasing proportion of low-caking, high-ash, and high-sulfur coal grades in the charge. This transformation in the composition of the feedstock adversely affects the thermotechnical parameters of the coking process, leading to uneven thermal decomposition of coal components and deteriorating the physico-mechanical properties of the resulting coke, thereby limiting its applicability in blast furnace operations. One of the promising approaches to correcting the technological characteristics of the coal charge is the application of polyvinyl alcohol (PVA) cryogels as a binding and structure-forming component during the partial briquetting of coal. The mechanisms of three-dimensional porous structure formation in PVA cryogels under cyclic freeze-thaw conditions are described, highlighting their water solubility, non-toxicity, excellent film-forming ability, and efficiency in stabilizing dispersed coal particles. Experimental studies are presented to determine the optimal PVA content, freezing regimes, and drying parameters of the briquettes. It has been established that the incorporation of 5–10% PVA ensures the formation of a robust cryogel matrix, which provides the briquettes with enhanced mechanical stability, reduces their brittleness, and prevents structural failure during transportation and charging into coking chambers. The study demonstrates that the use of PVA cryogels compensates for the deficit of high-caking coal grades, improves the homogeneity of the coal charge, intensifies the initial stages of carbonization, and ensures the production of coke with the required operational properties. The obtained results confirm the high efficiency of using PVA as an innovative tool for raw material modification under contemporary industrial and resource constraints, providing a viable strategy to optimize coke quality and overall process performance in modern coking operations.

Keywords: coal charge; charge quality; waste/by-products; briquetting; cryogels

Перспективи застосування багатоатомних спиртів як ефективних екологічних зв'язуючих у технології підготовки вугільної шихти для коксування

Катерина Шмельцер

Доцент, кандидат технічних наук, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-6830-8747

Марина Кормер

Доцент, кандидат хімічних наук, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: kormer@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-6509-0794

Наталія Десна

Доцент, кандидат технічних наук, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: desna@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0003-0768-7813

Анотація: Розглядається проблема погіршення якості сировинної бази коксохімічної промисловості України, що зумовлено зростанням частки слабоспівного, високозольного та високосірчастого вугілля у шихті. Така трансформація структури сировини негативно впливає на теплотехнічні показники процесу коксування, викликає нерівномірність термораспаду компонентів та погіршує фізико-механічні властивості одержуваного коксу, обмежуючи можливість його використання у доменному виробництві. Одним із перспективних шляхів корекції технологічних характеристик шихти запропоновано застосування кріогелів полівінілового спирту (ПВС) як зв'язувального та структуроутворювального компонента під час часткового брикетування вугілля. Описано механізми формування тривимірної пористої структури кріогелів ПВС у процесі циклічного заморожування-розморожування, їх водорозчинність, нетоксичність, високу плівкоутворювальну здатність та ефективність у стабілізації дисперсних частинок вугільної фракції. Наведено результати експериментальних досліджень щодо визначення оптимального вмісту ПВС, температурних режимів заморожування та параметрів сушіння брикетів. Встановлено, що введення 5–10 % ПВС забезпечує формування міцної кріогелевої матриці, яка надає брикетам підвищену механічну стійкість, знижує їх крихкість та запобігає руйнуванню на етапах транспортування і завантаження у камери коксування. Показано, що застосування кріогелів ПВС сприяє компенсації дефіциту добреспівного вугілля, покращує однорідність шихти, інтенсифікує початкові стадії карбонізації та забезпечує отримання коксу з необхідними експлуатаційними характеристиками. Отримані результати підтверджують високу ефективність використання ПВС як інноваційного засобу модифікації сировини в умовах сучасних виробничих та ресурсних обмежень.

Ключові слова: вугільна шихта; якість шихти; відходи; брикетування; кріогелі

Вступ (Introduction)

На сучасному етапі розвитку металургійної галузі у світовій практиці відсутні технології виробництва металу, які могли б повністю замінити доменний процес. Кокс залишається незамінним шихтовим компонентом, що виконує одночасно роль відновлювального агенту, палива та структуроутворювача шихти.

Попри значний рівень технічного розвитку доменного виробництва, його потенціал удосконалення ще не вичерпано. Подальші напрями модернізації визначаються насамперед сировинною базою, енергетичною ситуацією та економічними чинниками.

Особливу роль у стабільності доменного процесу відіграє паливна складова, важливість якої не викликає сумнівів серед фахівців. У зв'язку з цим якість коксу, як основного паливного й відновлювального матеріалу, набуває ключового значення. Підвищення його якості є одним із головних завдань сучасного коксохімічного виробництва, від якого безпосередньо залежить ефективність і економічність виплавки чавуну.

Прогрес у розвитку світового коксодоменного виробництва забезпечив значне підвищення якості коксу (*Farias Neto et al., 2021, Soloviov et al., 2024*), що дозволяє стабільно

використовувати пиловугільне паливо у кількості понад 200 кг на тонну чавуну без погіршення технологічних показників доменного процесу. На жаль, вітчизняна промисловість, унаслідок об'єктивних економічних та сировинних обмежень, поки що не досягла рівня найкращих світових стандартів якості коксу.

До основних вимог, що висуваються до кам'яновугільного коксу, належать висока газопроникність насипної маси, зумовлена його механічною міцністю при високих температурах, а також оптимальна щільність, яка визначає стійкість до стирання та руйнування (Miroshnichenko et al., 2023).

Однак сучасна вугільна сировинна база характеризується погіршенням марочного складу, нестабільністю фізико-хімічних властивостей і нерівномірністю постачання, що ускладнює завдання стабільного виробництва коксу необхідної якості.

Водночас вітчизняна наука та виробництво мають значний досвід і напрацювання у сфері створення високоефективних технологій коксування, спрямованих на підвищення якості готового продукту.

Особливе значення у процесі отримання кам'яновугільного коксу належить підготовці вугілля та вугільних сумішей до коксування. Одним із найперспективніших напрямів підвищення якості коксу та зниження його питомих витрат у доменному виробництві є удосконалення технології підготовки шихти, зокрема шляхом застосування спеціальних методів термічної та нетермічної обробки вугілля перед коксуванням.

В останні роки українські коксохімічні підприємства зіткнулися з гострим дефіцитом вугілля, придатного для коксування. Одночасно спостерігається тенденція до зростання цін на імпортне вугілля, що ускладнює забезпечення стабільної сировинної бази для галузі.

Паралельно відбувається збільшення видобутку слабоспівливого та сірчистого вугілля, що істотно обмежує можливості формування якісних шихт для шарового коксування. За сучасних умов для цих цілей можна використовувати лише близько 40 % вугілля, яке видобувається в Україні.

Марочний склад вугільної сировини характеризується наступним співвідношенням: газове (Г) – 56 %, довгополум'яне газове (ДГ) – 10 %, жирне (Ж) – 12,5 %, коксове (К) – 7 %, піснеспівливе (ПС) – 10 %, пісне (П) – 2 %. Таким чином, частка газового вугілля є надмірно високою, тоді як запаси цінних марок – коксового, жирного та піснувато співливого – у межах Донецького басейну становлять не більше ніж 0,33 % і продовжують скорочуватися.

За таких умов отримання коксу виключно зі співливого вугілля є неможливим, а подальше використання наявних запасів призведе до їх швидкого виснаження. Це зумовлює необхідність пошуку нових технологічних підходів до формування вугільної шихти та вдосконалення процесу коксування (табл. 1).

Таблиця 1. Склад шихти для шарового коксування КХП України по роках

Марка вугілля, %	1970 р.	1980 р	2010 р	2020 р.
Г	32,4	39,4	16,1	14,2
Ж	33,0	27,7	40,9	20,5
К	14,5	17,4	31,5	19,4
ПС	19,5	13,1	-	29,1
П	0,6	2,4	-	
Інші марки	-	-	11,5	16,8

Зі зростанням частки газового вугілля у шихті виникає потреба у збільшенні вмісту коксового та жирного вугілля, які забезпечують необхідну співливість суміші. Вугілля марки Ж, що видобувається у Донецькому басейні, характеризується високою співливістю ($y = 26\text{--}31$ мм), завдяки чому його можна змішувати з суттєвою кількістю неспівливого вугілля без значного погіршення якості коксу.

Однією з актуальних проблем залишається підвищений вміст сірки у вугільних пластах.

Сірчисте вугілля негативно впливає на процес термічної переробки вугільної шихти, знижує її коксівну здатність і створює як технологічні, так і екологічні труднощі під час коксування.

У зв'язку з цим на коксохімічних підприємствах України все ширше застосовується вугілля з низьким вмістом сірки, що імпортується з різних країн. За останні роки масова частка імпортного вугілля у шихті зросла з 11 % до 70 %.

У сучасних умовах використання лише коксового вугілля для коксування є неможливим через обмеженість його запасів та низький рівень видобутку. Тому у виробництві коксу застосовують вугільні шихти — суміші вугілля різних марок, підібрані у таких співвідношеннях, які забезпечують отримання продукту з необхідними фізико-хімічними властивостями та технологічними характеристиками.

Відповідно до вимог, прийнятих у європейській практиці, якість доменного коксу повинна відповідати певним показникам (табл. 2).

Таблиця 2. Основні показники якості доменного коксу за європейськими стандартами

№	Показник якості	Поз.	Норм. зн.	Характеристика показника
1	Механічна міцність, %	M ₂₅	≥ 88–90	Визначає стійкість коксу до руйнування при транспортуванні та завантаженні в доменну піч
2	Стиранність (при – 10 мм), %	M ₁₀	≤ 6–8	Характеризує ступінь утворення дріб'язку під час механічного навантаження
3	Реакційна здатність коксу, %	CRI	20–28	Показує здатність коксу реагувати з CO ₂ при 1100 °C
4	Міцність після реакції з CO ₂ , %	CSR	≥ 60–70	Визначає залишкову міцність коксу після реакції з вуглекислим газом
5	Вміст золи, %	A ^d	≤ 11–12	Впливає на вихід шлаку та витрату флюсів у доменному процесі
6	Вміст сірки, %	S ^d	≤ 0,6	Визначає якість чавуну та шлаку, впливає на екологічні показники
7	Вологість, %	W ^r	≤ 4	Впливає на теплотворну здатність і стабільність горіння
8	Насипна щільність, кг/м ³	ρ _n	420–480	Характеризує газопроникність коксового шару в доменній печі

Світова практика експлуатації доменних печей із використанням коксу, що відповідає зазначеним вимогам, підтвердила, що такий кокс забезпечує достатню газопроникність як у шахті, так і у високотемпературній зоні печі. Вважається, що показник реакційної здатності (CRI) має бути якомога нижчим, оскільки це зменшує витрати вуглецю коксу на газифікацію за реакцією Будуара.

Особливу увагу приділяють вмісту у коксі шкідливих домішок – золи, сірки, лужних сполук і фосфору, які негативно впливають на хід доменного процесу, властивості чавуну та шлаку. Вологість коксу також регламентується й не повинна перевищувати 5 %, що вважається прийнятним рівнем для мінімізації негативного впливу води на стабільність плавки.

Досягнення такого рівня якості коксу можливе лише за умови раціонального вибору сировинної та технологічної бази на всіх стадіях виробництва: від формування оптимального марочного складу вугільної шихти та технології її підготовки – до встановлення і суворого дотримання оптимальних параметрів процесу коксування.

У світовій практиці постійно ведуться дослідження, спрямовані на вдосконалення, підвищення ефективності та адаптацію технологій коксування до змін ринкової кон'юнктури, коливань цін на вугілля, кокс і залізорудну сировину.

Водночас в Україні спостерігається тенденційне погіршення сировинної бази коксування, зокрема щодо марочного складу вугілля. Починаючи з 1960-х років, забезпечення необхідної міцності коксу у межах традиційного шарового коксування стало проблематичним.

Вимушене збільшення частки вугілля марок Г, ДГ, ПС, П у шихті в межах наявних технологічних схем, як правило, призводить до системного зниження якості коксу – насамперед його механічної міцності та технологічних характеристик. Розв'язання цієї проблеми здійснювалося шляхом розроблення високопродуктивних процесів, що забезпечують отримання коксу високої якості з вугільних шихт зі зниженою спіклівістю.

Згідно з дослідженнями, проведеними в ДП «УХІН», оптимальна шихта для коксування повинна містити не менше 69 % спіклого вугілля марок Ж, К та ПС, тоді як частка газового вугілля має становити менше 31 % (*Butuzova, et al., 2015*).

Одним із перспективних напрямів підвищення якості кам'яновугільного коксу та зниження його питомих витрат у доменному виробництві є спеціальна підготовка вугілля та його сумішей до коксування. Цю підготовку можна здійснювати термічними або нетермічними методами.

Нетермічні методи підготовки мають враховувати особливості розвитку сировинної бази коксування, необхідність її диференціації, технічний стан пічного фонду, а також вимоги доменного виробництва до якості коксу. Їх застосування спрямоване на вирішення двох ключових завдань:

- одержання кондиційного коксу в умовах поступового погіршення якості вугільної сировини та змін марочного складу шихт;
- створення ефективних технологічних прийомів впливу на шихту з метою покращення якості кінцевого продукту.

Одним із найефективніших нетермічних способів підвищення коксівності шихт із підвищеним (понад 50–60 %) вмістом слабоспіклого вугілля є часткове брикетування із застосуванням зв'язувальних речовин (*Adeleke et al., 2022*).

Роль зв'язуючих речовин у процесі коксування частково брикетованих шихт. Коксохімічна промисловість має великий досвід у застосуванні органічних добавок до шихт для коксування. Для цих цілей використовують різноманітні речовини, отримані в процесах нафтової та коксохімічної промисловості: мазут, гас, бітуми, залишки високотемпературних процесів, кам'яновугільну смолу, пек, а також відходи виробництва.

Широкий асортимент органічних добавок має різні агрегатні стани — тверді, пластичні та рідинні. Це, у свою чергу, визначає особливості технології приготування брикетів.

Найбільш часто для зв'язування використовують нафтові продукти (важкий залишок від переробки смолистих нафт), кам'яновугільну смолу, кам'яновугільний пек, сланцеві бітуми, смоли напівкоксування та фуси напівкоксування. Брикети, виготовлені на основі кам'яновугільного пеку, відрізняються підвищеною термостійкістю.

Зв'язуючі речовини повинні мати не лише в'язучі, але й спікаючі властивості, забезпечуючи при цьому: високий вихід і високу якість брикетів, стабільну роботу брикетних агрегатів та допоміжного обладнання, отримання міцного коксу, а також відсутність небажаних побічних ефектів. Важливими вимогами також є доступність, екологічність і економічність застосовуваних матеріалів.

Механізм дії органічних добавок, за даними УХІНу, полягає у зсуві реакцій термодеструкції в бік відновлювальних процесів. Це веде до збільшення утворення рідинних нелетких продуктів деструкції, що підтверджується зниженням вмісту водню та метану в газах, що утворюються при температурах до 500°C.

Як наслідок, спостерігається зменшення уявної в'язкості пластичної маси, збільшення товщини пластичного шару і розширення температурного діапазону пластичного стану вугілля.

Таким чином, застосування органічних добавок є одним із перспективних напрямків для покращення якості коксу та розширення вугільної сировинної бази.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

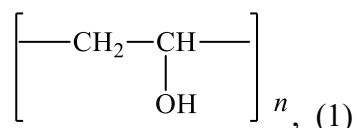
Об'єктом дослідження була вугільна шихта, яку обробляли кріогелем на основі полівінілового спирту. Кріогелі, наповнені частинками вугільної шихти або сажі ($d \approx 0\text{--}3$ мм), одержували введенням дрібнодисперсного вугілля у водний розчин полівінілового спирту (ПВС) у кількості 25–60 мас.%. Подальше проведення циклу заморожування–відтавання забезпечувало формування структурованих кріогелів із рівномірним розподілом наповнювача в полімерній матриці.

Встановлено, що оптимальний вміст дрібнодисперсного вугілля у складі брикету становить не більше 60 %. Збільшення його частки понад зазначене значення спричиняє неповне просочування частинок розчином полівінілового спирту (ПВС) та утворення міжчастинкових пустот. У результаті після сушіння спостерігалось зниження міцності зразків і їх часткове руйнування [Ауааet al., 2025].

Імовірно, зниження міцності брикетів за підвищеного вмісту дрібнодисперсного вугілля пов'язане з обмеженим змочуванням поверхні частинок полімерним розчином та зниженням ефективності міжчастинкової адгезії. Надлишок твердого компонента призводить до формування пористої структури з недостатньою кількістю зв'язувальної фази, що негативно впливає на однорідність та механічну стабільність сформованого матеріалу. Для запобігання цьому доцільно регулювати співвідношення вугілля та ПВС з урахуванням дисперсності наповнювача та в'язкості розчину зв'язувальної речовини.

Результати (Results)

Властивості полівінілового спирту (ПВС) і кріогелів на його основі. У даній роботі як зв'язувальну речовину для виготовлення вугільних брикетів запропоновано використовувати кріогелі полівінілового спирту (ПВС). Полівініловий спирт є штучним карболанцоговим регулярним лінійним полімером, який являє собою полі-1-гідроксіетилен загальної формули:



Фізико-хімічні властивості ПВС значною мірою залежать від способу його одержання - зокрема, від умов полімеризації полівінілацетату та ступеня його омилення. Залежно від молекулярної маси (від 10000 до 1000000) та вмісту залишкових ацетатних груп, що залишаються після гідролізу полівінілацетату, отримують кілька марок ПВС, які відрізняються за розчинністю у воді та в'язкістю.

За кімнатної температури близько 70 % гідроксильних груп полімеру перебувають у зв'язаному стані. Практично повне руйнування водневих зв'язків спостерігається при температурі близько 150 °С. Завдяки наявності великої кількості гідроксильних груп ПВС розчиняється лише в гарячій воді (80–100 °С) при інтенсивному перемішуванні протягом 2–4 годин.

Полівініловий спирт є твердим полімером білого кольору, без запаху і смаку, нетоксичним. При термообробці в інтервалі температур 80–225 °С він здатний до кристалізації, досягаючи ступеня кристалічності до 68 %. Макромолекули ПВС містять близько 1,0–2,5 % ланок, присднаних за типом «голова до голови», і мають атактичну будову. Механічні властивості полімеру визначаються міжмолекулярною взаємодією гідроксильних груп і залежать від орієнтації макромолекул (Bala-Litwiniak et al., 2019).

На сучасному етапі промисловий синтез полівінілового спирту здійснюється гідролізом полівінілацетату. ПВС є одним із найпоширеніших синтетичних водорозчинних полімерів, що

завдяки своїм фізико-хімічним властивостям широко застосовується як зв'язувальна речовина в різних технологічних процесах, зокрема у виробництві вугільних брикетів.

Широке застосування полівінілового спирту (ПВС) зумовлене поєднанням його цінних властивостей: нетоксичністю, розчинністю у воді, стійкістю до дії органічних розчинників, високою міцністю та здатністю до утворення міцних плівок (*Yankovych et al., 2025*).

Водні розчини ПВС після заморожування при від'ємних температурах (нижче 0 °C) і подальшого відтавання формують пружні полімерні матеріали - криогелі (*Rajput et al., 2022*).

Процес кріотропного гелеутворення є багатостадійним. На початковому етапі полімер розчиняють у розчиннику, найчастіше у воді або диметилсульфоксиді. Після одержання однорідного розчину систему частково заморожують і витримують протягом певного часу при заданій негативній температурі. Кристалізація основної маси розчинника є необхідною умовою для формування гетерогенної структури гелю.

У замороженому стані система набуває двофазної структури: одна фаза складається з полікристалів замерзлого розчинника, інша - з тонких прошарків незамерзлої рідини, у яких концентруються гелеутворюючі компоненти. Під час розморожування ці ділянки утворюють пористу полімерну матрицю, пори якої заповнюються розтопленим розчинником і набувають округлої форми завдяки силам поверхневого натягу (*Hasan et al., 2025, Stauffer et al., 1992*).

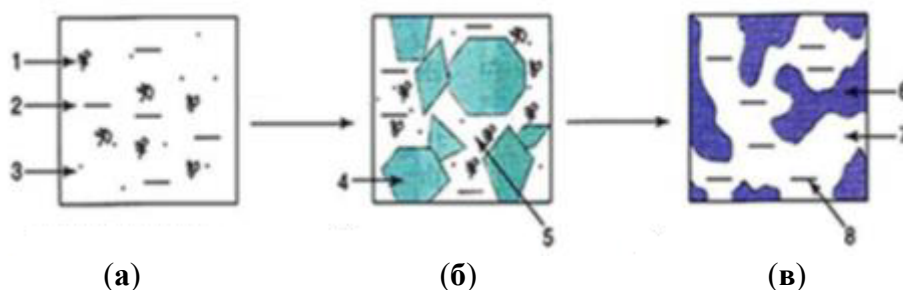


Рисунок 1. Схема процесу кріотропного гелеутворення

а) вихідна система; б) заморожена система; в) система після відтавання

1 – високомолекулярна гелеутворююча вихідна речовина; 2 – розчинник; 3 – низькомолекулярний гелеутворюючий вихідна речовина; 4 – полікристали замерзлого розчинника; 5 – незамерзла рідка мікрофаза; 6 – полімерна сітка криогеля; 7 – макропори; 8 – розчинник, що розтанув

У випадку нековалентних (фізичних) криогелів процес гелеутворення відбувається під час розморожування заморожених препаратів. Умови кожної стадії, а також властивості конкретних попередників, значно впливають на ефективність утворення кріотропного гелю, що, у свою чергу, визначає властивості та структуру отриманих криогелевих матеріалів.

Фізико-хімічні та реологічні характеристики, а також макро- і мікроструктура криогелів можуть бути регульовані в широкому діапазоні шляхом варіювання таких параметрів, як режим кріогенної обробки (температура та тривалість заморожування, швидкість відтавання, кількість циклів заморожування-розморожування тощо), а також характеристика полімеру, (молекулярна маса, молекулярно-масовий розподіл, вміст залишкових ацетатних груп, тактовність і концентрація) (*Botha et al., 2021*).

Перша гіпотеза щодо механізму гелеутворення полімерних розчинів полягає у механічній деструкції полімерних ланцюгів під впливом динамічної напруги, що виникає при кристалізації низькомолекулярного розчинника. З сучасної точки зору, в розчині ПВС при заморожуванні розвиваються процеси, що сприяють утворенню макрорадикалів полімеру.

Температура плавлення утворених криогелів перевищує 70 °C. Механічні властивості кріоструктуратів істотно відрізняються від властивостей вихідних в'язкотекучих композицій,

що дозволяє використовувати пружні кріогелі як зв'язуючий матеріал. Вони є перспективним матеріалом для брикетування дрібнодисперсних частинок.

Введення модифікаторів і наповнювачів у вихідну полімерну композицію (водний розчин ПВС) може значно покращити фізико-механічні та споживчі властивості кінцевого продукту.

Для брикетування можна використовувати ПВС з молекулярною масою від 50 000 до 150 000. Встановлено, що для утворення кріогелів необхідна мінімальна концентрація полімеру в розчині не менше 5 %. Ці дані свідчать про те, що у таких розчинах вже існує суцільна флуктуаційна сітка з переплутаних макромолекулярних ланцюгів, наявність якої підтверджується проявом ефекту Вайссенберга, характерного для неньютонівських рідин [Beavers et al., 1977]. Ефект Вайссенберга полягає в тому, що неньютонівська рідина (розчин полімерів) піднімається і «намотується» на обертовий стрижень замість того, щоб відкидатися назовні. Це відбувається через те, що полімерні ланцюжки закручуються навколо стрижня, створюючи натяг, який змушує рідину підніматися. Це є наслідком нормального напруження, яке діє як кільцеве навколо стрижня.

Для отримання кріогелів водні розчини ПВС різних концентрацій заливають у циліндричні комірки та заморожують при температурі мінус 20 °С протягом 24 годин, після чого їх розморожують за кімнатною температурою. Утворюються еластичні каучукоподібні кріогелі) (Henning et al., 2017).

При вмісті полімеру нижче 5 % з нього після циклу заморожування-відтавання кріогелі не утворюються. З практичної точки зору, для отримання кріогелів доцільно використовувати мінімальну концентрацію полівінілового спирту, тому для отримання брикетів доцільно використовувати 5-10 мас.% водний розчин ПВС (Korol et al., 2025).

Технологічна схема отримання брикетів була розроблена на основі (Jindaporn et al., 2015): порошок ПВС розчиняли у воді, далі змішували цей розчин з просоченими маслом частинками вугільної шихти та завантажували в ємності певної форми і об'єму. Далі цю суміш вібраційне ущільнювали та заморожували протягом доби. Після розморожування брикетів у природних умовах їх сушили.

При термообробці брикетів варіювалося 2 фактори – температура та тривалість процесу. У ряді досліджуваних режимів проводилося підсушування отриманих брикетів при температурі 80-90 °С. Міцність брикетів оцінювалася методом роздавлювання із контролем максимального зусилля, яке витримує брикет. Визначення характеристик міцності проводилося після остигання брикетів до кімнатної температури.

Кокс має капілярно-пористу структуру, тому для запобігання абсорбції води його частинками їх попередньо просочували поглинальним кам'яновугільним маслом, а потім змішували з водним розчином ПВС.

Оптимальний вміст дрібного вугілля у брикету не більш 60 %, при його збільшенні спостерігається недостатнє просочування частинок розчином ПВС і утворення пустот між ними, тому такі брикети після сушіння розсипалися. Склад та фізичні властивості брикетів представлені у табл. 3.

Таблиця 3. Склад брикетів на основі полівінілового спирту

№	Склад брикетів, %				Міцність, МПа	Калорійність, МДж/кг
	ПВС	Вугілля	Вода	Масло		
1	15,5	49,5	35	-	29,5	30,6
2	10,5	39,5	50	-	29,9	31,8
3	25,5	49,5	45	-	27,3	30,1
4	20,5	59,5	9,5	9,5	32,4	29,5
5	30,5	49,5	9,5	9,5	33,8	35,2

Технологічна схема отримання брикетів була розроблена на основі (Jindaporn et al., 2015): порошок ПВС розчиняли у воді, далі змішували цей розчин з просоченими маслом

частинками вугільної шихти та завантажували в ємності певної форми і об'єму. Далі цю суміш вібраційно ущільнювали та заморожували протягом доби. Після розморожування брикетів у природних умовах їх сушили.

Висновки (Conclusions)

Розуміння основних принципів брикетування дозволяє ефективно вирішувати завдання щодо розширення застосування цієї технології та оптимізації використання її продуктів. Це дає можливість правильно визначити пріоритети та адаптувати методи виробництва брикетів відповідно до вимог сучасної промисловості, що є важливим для досягнення довгострокових цілей розвитку глобальної економіки.

Брикетування дрібного вугілля з використанням зв'язуючого є перспективним напрямом, що потребує подальшого розвитку, особливо у створенні нових технологій брикетування комбінованих сумішей енергетичних палив і коксівного вугілля. Це дозволяє ефективно використовувати різні види вугілля в коксовому виробництві.

Пелетизація кам'яного вугілля перед коксуванням відкриває нові можливості для застосування неспікальних сортів вугілля, що значно знижує витрати на коксове виробництво та підвищує його ефективність.

Брикетування дозволяє забезпечити максимальний контакт частинок вугілля та їх ущільнення, що збільшує одноразове завантаження коксових пічних камер, підвищує продуктивність процесу коксування та покращує механічні властивості коксу.

Моделювання процесів брикетування на основі відходів полідисперсних коксових частинок та криогелів полівінілацетату, а також експериментальні дослідження дозволили розробити методику створення міцних брикетів з дрібного коксу та вугільних відходів, а також утилізації інших компонентів з відновлювальними властивостями.

Запропоноване технічне рішення, яке передбачає використання відходів виробництва коксу, не тільки дозволяє знижувати витрати, але й має позитивний вплив на екологічну безпеку, зменшуючи вплив на навколишнє середовище.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація, К. М.; методика, Ш. К.; формальний аналіз, Д. Н.; аналітичні дані, К. М.; візуалізація, Ш. К.; нагляд, К. М.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Adeleke, A.A., Odusote, J.K., Ikubanni, P.P., Adebisi, J.A. & Adesina, O.S. (2022). Briquetting of Subbituminous Coal and Torrefied Biomass Using Bentonite as Inorganic Binder. *Sci. Rep.* 12, 8716. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12685-5>
- Ауаа, F., Oyedotun, K., & Lubwama, M. *et al.* (2025). Production and Characterization of Densified Briquettes From Nanocomposite Biochar-Cellulose Nanocrystal (Biochar-CNC) Reinforced with Polyvinyl Alcohol (PVA). *Waste Biomass Valor.* 16, 2075–2095. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03005-9>

- Bala-Litwiniak, A., & Radomiak, H.(2019). Possibility of the Utilization of Waste Glycerol as an Addition to Wood Pellets. *Waste Biomass Valor.* 10, 2193–2199 . <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0260-7>
- Botha, D.L., Leokaoke, N.T., Bunt, J.R., & Neomagus, H. (2021). Evaluation of polymer binders in briquetting of coal fines for combustion applications. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121, 3, 113–118. <http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/991/2021>
- Butuzova, L. F., Makovskii, R. V., Kleshnya, G. G. & Milov, D. Yu. (2015). Koksuvannya vugilnikh sumishei z velikim vmistom slabospiklivogo ta sirchistogo vugillya. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovikh tekhnologii.* 73, 1/5, 61-66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.37022>
- Farias Neto. G.W., Leite, M.B.M. & Marcelino, L.O.(2021). Optimizing the coke oven process by adjusting the temperature of the combustion chambers. *Energy*, 15, 119419. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119419>
- Hasan, H.A., Saharuddin, S.N.D.M. & Muhamad, M.H.(2025). Unlocking the Potential of Polyvinyl Alcohol (PVA) as a Biocarrier for Enhanced Wastewater Treatment: A Comprehensive Review. *J. Water Process Eng.*, 74, 107780. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107780>
- Henning, C.N., Leokaoke, N.T., Bunt J.R. & Waanders, F.B. (2017). Testing of Briquettes Made from Witbank Coal Fines with Polyvinyl Alcohol as Binder. *Fuel Processing Technology.* 159, 88-95. <https://eares.org/siteadmin/upload/4301EAP1118226.pdf>
- Jindaporn J., & Chaloenporn L. (2015). Properties of Densified-Refuse Derived Fuel Using Glycerin as a Binder. *Procedia Engineering* 100, 505. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.397>
- Korol N., & Yankovych V. (2025). Polyvinyl Alcohol-Based Binder Systems for Biomass and Charcoal Briquettes. *Fuels*, 6, 81. <https://doi.org/10.3390/fuels6040081>
- Miroshnichenko, D.; Shmeltser, K.; Kormer, M. (2023). Factors affecting the formation the carbon structure of coke and the method of stabilizing its physical and medical properties. *C-J. Carbon Res*, 9, 66. <https://doi.org/10.3390/c9030066>
- Rajput, S. P., & Thorat B. N. (2022). Recovered polyvinyl alcohol as an alternative binder for the production of metallurgical quality coke breeze briquettes. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42, 3, 475-485. <https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1619558>
- Silva Viana, R., André May, A., & Almeida Moreira, *et al.* B.R.(2023). Addition of Glycerol to Agroindustrial Residues of Bioethanol for Fuel-Flexible Agropellets: Fundamental Fuel Properties, Combustion, and Potential Slagging and Fouling from Residual Ash. *Industrial Crops and Products.* 192, 116134. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116134>
- Soloviov, Ye. O., Miroshnychenko, D. V., Zelenskyi O. I., Pyshiev, & S. V. (2024). Suchasni tekhnologii pererobky palnykh kopalyn : tezy dop. 7-yi Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 17-18 kvitnia 2024 r. / Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t", Ukr. derzh. n.-d. vuhlekhim. in-t (UKhIN). Kharkiv: NTU "KhPI", 28-33. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79044>
- Yankovych, V. & Korol, N. (2025). Mechanochemical and Molecular Analysis of Organic Binders in Charcoal Briquetting for Enhanced Cold Mechanical Strength. *Cleaner Engineering and Technology*, 29. 101113. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101113>



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

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

JEL: L61

DOI: 10.62911/ete.2025.03.02.09

Digital measurement of shaft rotation speed based on encoder signal: error analysis and adaptive method

Citation:

Lytovchenko O., Lytovchenko Y., Khyzhniak V., & Modlo Y. (2025). Digital measurement of shaft rotation speed based on encoder signal: error analysis and adaptive method. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", Vol.3 No.2 (2025), 101–110. <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.09>

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

Yuliia Lytovchenko

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
e-mail: lytovchenko@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0009-0004-0996-3441

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

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

Abstract: The article analyzes the errors of digital measurement of speed (DVS) of rotation of the electric drive shaft using the signal of the angle sensor (AOS), which is part of the encoder, since in modern process automation systems (AUS TP) two different measuring devices are traditionally used to control the position and speed of rotation of the drive motor shaft: an encoder and a tachogenerator. The aim of the work is to develop an adaptive method for digital measurement of shaft rotation speed with reduced methodological error based on the existing encoder. The essence of the method is to count the number of pulses of a highly stable clock generator (timer) during one signal period. The methodological and dynamic components of the error are considered, their analytical dependencies and the results of numerical modeling for low-speed and high-speed mechanisms of metallurgical production are given. A method for reducing methodological error by increasing the measurement base is proposed and tested. The implementation of an economical DCS system based on a 16-bit microcontroller is shown, which provides a combination of position and speed measurement functions in a single sensor and eliminates the need to use a tachogenerator. The cost of the proposed solution is 6-7 times lower than the cost of a traditional scheme using a tachogenerator, since the indicated cost of the proposed solution is about 450 UAH (microcontroller and minimal wiring), which is significantly lower than the cost of an industrial tachogenerator (from 3000 UAH). The exclusion of the tachogenerator also simplifies installation, reduces the dimensions of the control cabinet and increases the reliability of the system by reducing the number of components.

Keywords: encoder, sensor rotation angle, digital speed measurement, methodical error, dynamic error, microcontroller, process control system.

Received: 19/12/2025

Accepted: 22/12/2025



JEL: L61

Digital measurement of shaft rotation speed based on encoder signal: error analysis and adaptive method

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

Yuliia Lytovchenko

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

e-mail: lytovchenko@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0009-0004-0996-3441

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

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

Abstract: The article analyzes the errors of digital measurement of speed (DVS) of rotation of the electric drive shaft using the signal of the angle sensor (AOS), which is part of the encoder, since in modern process automation systems (AUS TP) two different measuring devices are traditionally used to control the position and speed of rotation of the drive motor shaft: an encoder and a tachogenerator. The aim of the work is to develop an adaptive method for digital measurement of shaft rotation speed with reduced methodological error based on the existing encoder. The essence of the method is to count the number of pulses of a highly stable clock generator (timer) during one signal period. The methodological and dynamic components of the error are considered, their analytical dependencies and the results of numerical modeling for low-speed and high-speed mechanisms of metallurgical production are given. A method for reducing methodological error by increasing the measurement base is proposed and tested. The implementation of an economical DCS system based on a 16-bit microcontroller is shown, which provides a combination of position and speed measurement functions in a single sensor and eliminates the need to use a tachogenerator. The cost of the proposed solution is 6-7 times lower than the cost of a traditional scheme using a tachogenerator, since the indicated cost of the proposed solution is about 450 UAH (microcontroller and minimal wiring), which is significantly lower than the cost of an industrial tachogenerator (from 3000 UAH). The exclusion of the tachogenerator also simplifies installation, reduces the dimensions of the control cabinet and increases the reliability of the system by reducing the number of components.

Keywords: encoder, sensor rotation angle, digital speed measurement, methodical error, dynamic error, microcontroller, process control system.

Цифрове вимірювання швидкості обертання валу на базі сигналу енкодера: аналіз похибок і адаптивний метод

Олександр Литовченко

асистент, Державний Університет економіки і технологій, Україна

e-mail: lytovchenko_ov@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-2142-2697

Юлія Литовченко

асистент, Державний Університет економіки і технологій, Україна

e-mail: lytovchenko@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0009-0004-0996-3441

Вячеслав Хижняк

доцент, к.т.н., Державний Університет економіки і технологій, Україна

e-mail: krogzhuns@gmail.com

 ORCID ID: 0000-0001-6449-2778

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

Анотація: У статті проведено аналіз похибок цифрового вимірювання швидкості (ЦВШ) обертання вала електропривода за сигналом датчика кута повороту (ДКП), що входить до складу енкодера, оскільки в сучасних системах автоматизації технологічних процесів (АСУ ТП) для контролю положення та швидкості обертання валу приводного двигуна традиційно застосовуються два різні вимірювальні пристрої: енкодер і тахогенератор. Як мету роботи – поставлено розробка адаптивного методу цифрового вимірювання швидкості обертання валу зі зниженою методичною похибкою на основі існуючого енкодера. Суть методу полягає у підрахунку числа імпульсів високостабільного тактового генератора (таймера) протягом одного періоду сигналу. Розглянуто методичну та динамічну складові похибки, наведено їх аналітичні залежності та результати чисельного моделювання для тихохідних та швидкохідних механізмів металургійного виробництва. Запропоновано та апробовано метод зниження методичної похибки шляхом збільшення бази вимірювання. Показано реалізацію економічної системи ЦВШ на основі 16-розрядного мікроконтролера, що забезпечує суміщення функцій вимірювання положення та швидкості в єдиному датчику та усуває потребу використання тахогенератора. Вартість запропонованого рішення у 6-7 разів нижча за вартість традиційної схеми із застосуванням тахогенератора, оскільки вказана вартість запропонованого рішення складає близько 450 грн (мікроконтролер та мінімальне обв'язування), що значно нижче вартості тахогенератора промислового виконання (від 3000 грн). Виключення тахогенератора також спрощує монтаж, знижує габарити шафи керування та підвищує надійність системи за рахунок зменшення кількості компонентів.

Ключові слова: енкодер, датчик кута повороту (ДКП), цифровий вимір швидкості (ЦВШ), методична похибка, динамічна похибка, мікроконтролер, АСУ ТП.

Вступ (Introduction)

У сучасних системах автоматизації технологічних процесів (АСУ ТП) для контролю положення та швидкості обертання валу приводного двигуна традиційно застосовуються два різні вимірювальні пристрої: енкодер і тахогенератор (*Anuchin, 2015; Babenko et al, 2002*) Цей підхід збільшує вартість, складність монтажу та кількість апаратних модулів у шафі управління.

Питання цифрового вимірювання швидкості за сигналами інкрементальних енкодерів розглядалися в роботах (*Konstruktyv ta zastosuvannia enkoderiv, 2025; Kosmodrom, 2025*), проте проблема мінімізації методичної похибки для високошвидкісних режимів роботи промислових механізмів залишається недостатньо висвітленою. Існуючі методи корекції похибок (*Metodyka zmenshennia systematychnykh pokhybok vymiriuvan kutovoi shvydkosti optychnym enkoderom, 2015; Usynin, 2004*) вимагають ускладнення алгоритмів обробки або застосування дорогих високороздільних енкодерів.

Водночас, вимірювання швидкості обертання електричних двигунів є критично важливим для аналізу їхніх робочих характеристик (*Shubenko & Braslavskyi, 1972*)

Актуальним завданням є розробка методів та засобів, що дозволяють використовувати сигнал існуючого енкодера не тільки для визначення положення, але і для високоточного вимірювання швидкості. Таке суміщення функцій вимірювання положення та швидкості в одному датчику дозволяє відмовитися від тахогенератора, спростити систему та знизити її вартість. Основними проблемами при реалізації ЦВШ є методична та динамічна похибки, аналіз яких та методи їх мінімізації є предметом даного дослідження.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Розробка адаптивного методу цифрового вимірювання швидкості обертання валу зі зниженою методичною похибкою на основі існуючого енкодера, забезпечує суміщення функцій вимірювання положення і швидкості у єдиному датчику, та його реалізація на базі економічного мікроконтролерного рішення.

Результати (Results)

Принцип роботи інкрементального енкодера заснований на генерації послідовності імпульсів при обертанні вала. Кількість імпульсів на один оберт (N) є ключовою характеристикою датчика.

Швидкість обертання визначається шляхом вимірювання періоду (T_i) проходження імпульсів ДКП. Суть методу полягає у підрахунку числа імпульсів високостабільного тактового генератора (таймера) протягом одного періоду сигналу ДКП [6]. Якщо частота таймера дорівнює F_T [Гц], а число підрахованих імпульсів за час T_i дорівнює m , то період імпульсу ДКП становить:

$$T_i = m / F_T, [c] \quad (1)$$

Тоді частота обертання валу n [об/хв] визначається за такою формулою:

$$n = 60 / (N \cdot T_i) = (60 \cdot F_T) / (N \cdot m), [об/хв] \quad (2)$$

де N — кількість імпульсів ДКП на один оберт вала [імп/об].

Аналіз методичної похибки

Як показано на рис. 1 основним джерелом методичної похибки (Q) є дискретність вимірювання часу. Оскільки початок та кінець інтервала вимірювання (T_i) не синхронізовані з тактами таймера, абсолютна похибка вимірювання періоду становить ± 1 імпульс таймера

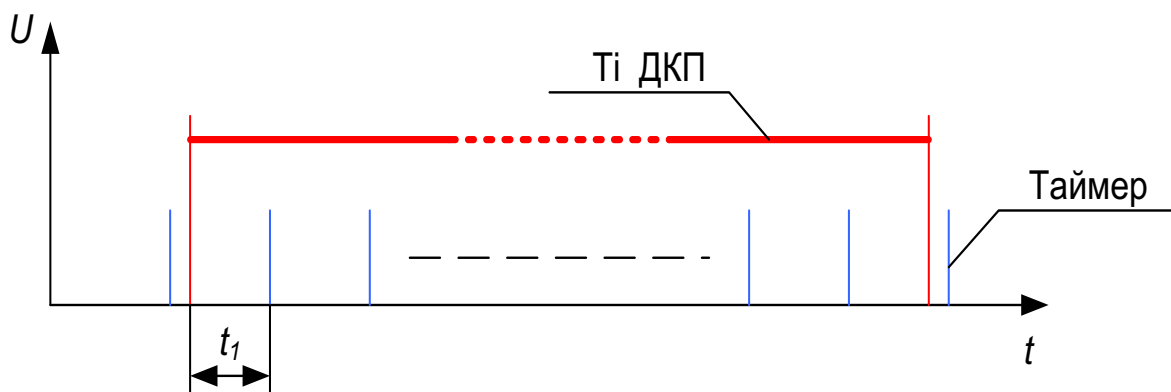


Рисунок 1. Принцип цифрового вимірювання швидкості

На рис.1 позначено:

T_i ДКП - тривалість його імпульсу (тривалість імпульсу обернено пропорційна швидкості обертання вала),

t_1 – проміжок часу, що зумовлює похибку виміру.

Таким чином, відносна методична похибка вимірювання періоду, а отже, і швидкості визначається як:

$$\delta Q = (1 / m) \cdot 100\%, (3)$$

З формули (3) випливає, що похибка δQ зростає зі зменшенням m , тобто зі збільшенням швидкості обертання (зменшенням T_i).].

Під час зміни швидкості обертання (розгоні або гальмуванні приводу) період T_i не є постійним протягом часу вимірювання.

Це призводить до виникнення динамічної похибки (S). Величина динамічної похибки швидкості [об/хв] може бути оцінена за формулою:

$$S = T_i \cdot a, (4)$$

де a – кутове прискорення приводу [об/хв/с], T_i – період імпульсу ДКП [с].

З виразу (4) видно, що динамічна похибка знижується зі зменшенням періоду T_i , тобто зі зростанням швидкості обертання і кількості імпульсів N на оберт.

На рис.2 та рис.3 представлені графіки зміни відносної методичної Q (штрихова лінія) та динамічної S (штрихпунктирна лінія) похибок вимірювання поточного значення швидкості та тривалості (T_i) періоду проходження сигналу ДКП (суцільна лінія) для тихохідних та швидкохідних механізмів.

В якості прикладу за тихохідні механізми приймаємо механізми головного приводу блюмінгу, летючих ножиць та ін., в якості швидкохідних – натискний пристрій блюмінгу, валків безперервно-заготівельних, сортових станів та ін. Символом N на рисунках позначено кількість імпульсів ДКП на один його оберт.

Як видно з рис.2 та рис. 3 похибка Q збільшується зі зростанням кількості ДКП на один оберт, відповідно, пропорційно збільшенню швидкості обертання (зменшення тривалості періоду сигналу ДКП). Динамічна похибка S зменшується зі зростанням кількості імпульсів ДКП на оберт.

Для графіків рис.2 та 3 розрахункові вирази для визначення поточного значення швидкості (n) мають вигляд

$$n = K / (N \cdot T_i), (5)$$

де N – кількість імпульсів ДКП на оберт,

T_i – період імпульсу в секундах

Для розрахунку S з виразу (4) величина прискорення (уповільнення) була прийнята 30 об/хв/сек.

Наведемо приклад визначення величини K за умови, що $N = 60$. Тоді при швидкості, що дорівнює 60 об/хв період $T_i = 1/60 = 0,01667$ сек і $K = 60 \times 60 \times 0,01667 = 60,012$.

Виконаємо перевірку визначення K для швидкості 120 об/хв. У цьому період $T_i = 0,00833$ сек і $n = 60,012/60 \times 0,00833 = 60,012/0,4998 = 120,07$ об/хв. Відносна похибка δ розрахунку $\delta = 7/120 = 0,058\%$.

Аналіз рис.2 і 3 показує, що похибку Q можна зменшити, якщо, наприклад, після швидкості двигуна в 400 об/хв, швидкість визначати не по одному, а по двох імпульсах ДКП.

Виконаємо перевірку цього при допущеннях $N = 600$ імп/об, частота таймера 1МГц, прискорення (уповільнення) 30 об/хв/сек. Результати розрахунків зведемо в Табл.1. Зазначимо, що, як видно з рис.2 та 3, динамічна похибка S зі зростанням швидкості зменшується.

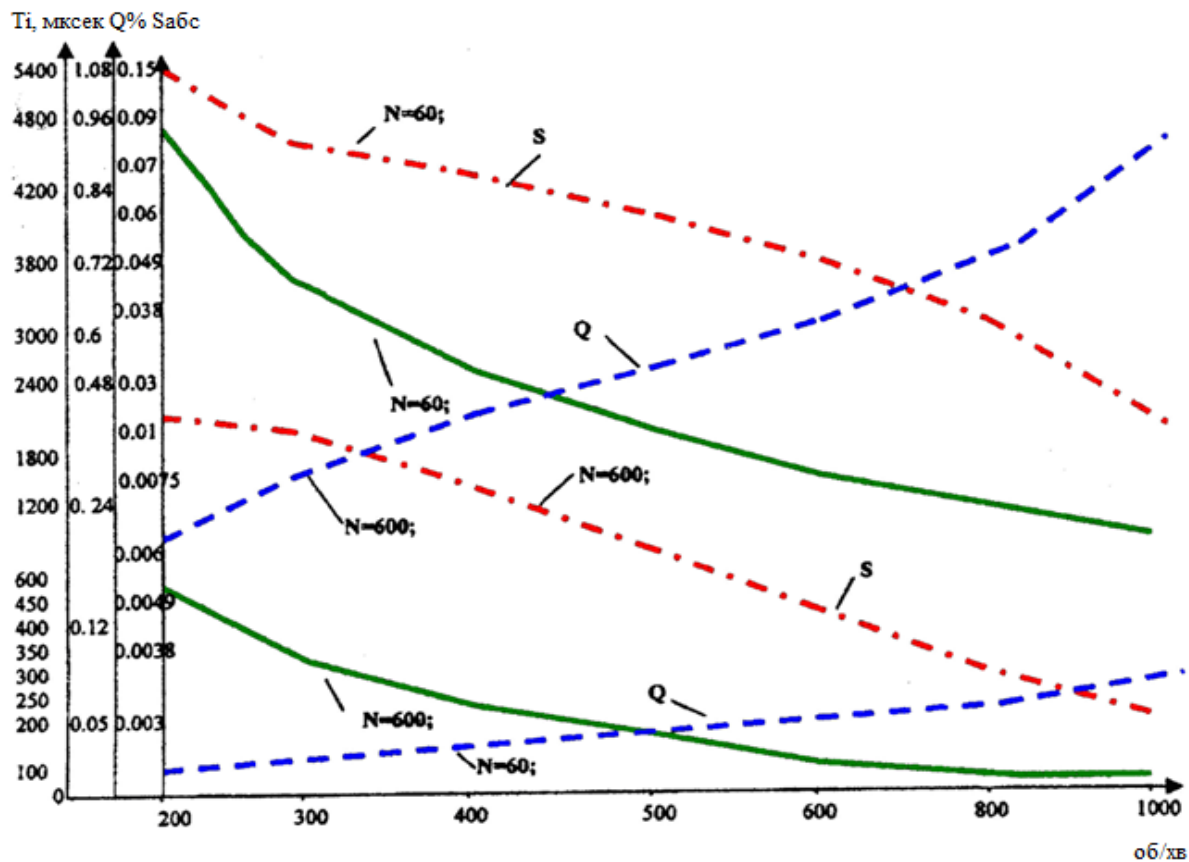


Рисунок 2. Залежність похибок ЦВШ для швидкохідних механізмів ($N=60$, $N=600$)

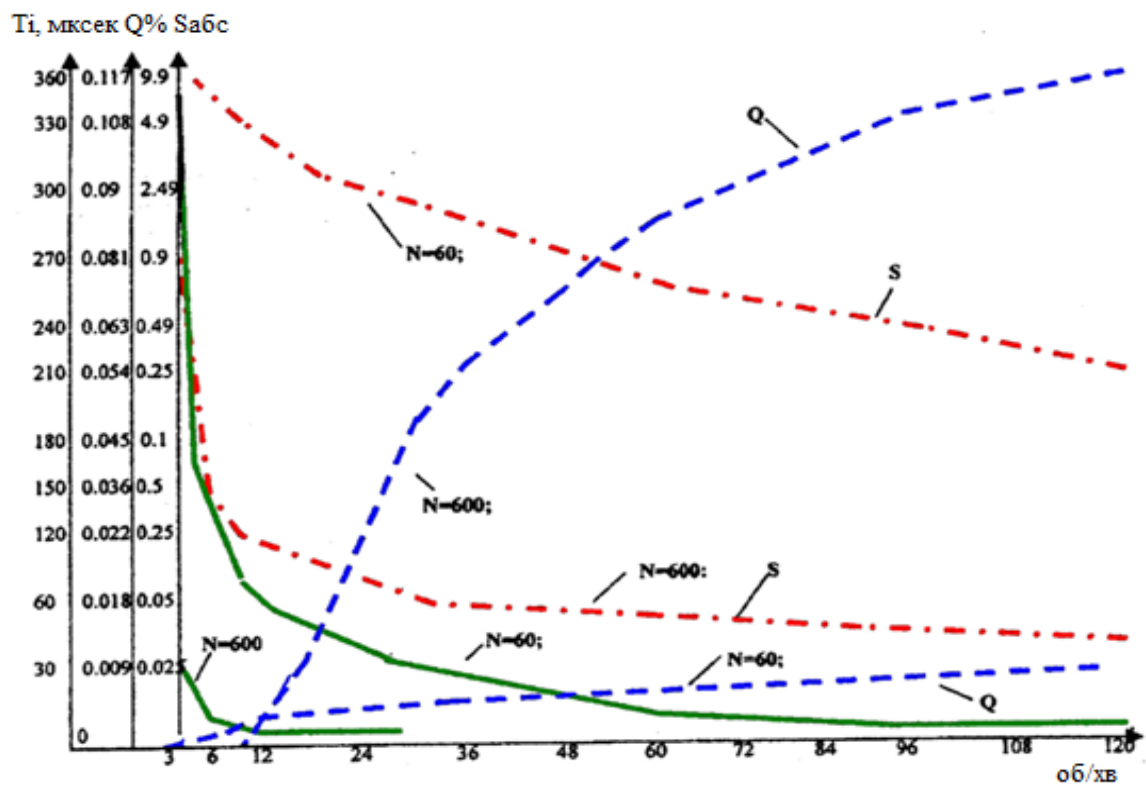


Рисунок 3. Залежність похибок ЦВШ для тихохідних механізмів ($N=60$, $N=600$)

Таблиця 1. Результати розрахунків величин похибок

№	n, об/хв	T ₁₁ , мксек	T ₁₂ , мксек	Q ₁ , %	Q ₂ , %
	1	2	3	4	5
1	200	500	-	0,5	-
2	400	250	500	0,4	0,2
3	600	166	332	0,6	0,3
4	800	125	250	0,8	0,4
5	1000	100	200	1,0	0,5

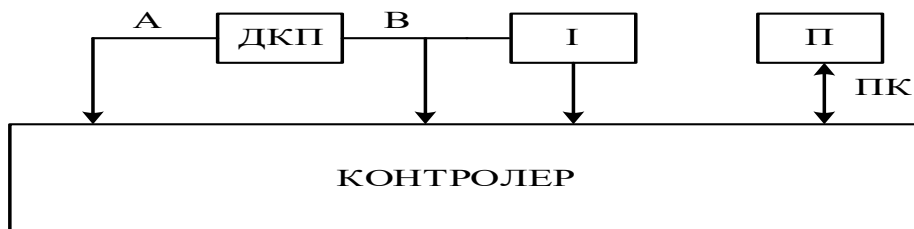
З граф 4 і 5 Табл.1 видно, що похибка Q при визначенні швидкості по двох послідовних імпульсах ДКП зменшується в два рази

Табл.1 T₁₁ – тривалість одного імпульсу ДКП, T₁₂ – тривалість двох, послідовних один за одним імпульсів ДКП, Q₁,%, Q₂,% - величина відносної похибки для першого і другого способу вимірювань.

Запропонований метод дозволяє в 2 рази знизити методичну похибку в області високих швидкостей. На практиці значення K може бути адаптивно збільшено для підтримки похибки в заданих межах у всьому діапазоні вимірюваних швидкостей.

На рис. 4 зображені технічні засоби, необхідні для ЦВШ за умови, що ДКП розміщений в енкодері. Для реалізації запропонованого алгоритму ЦВШ потрібно придбати, запрограмувати мікроконтролер та зробити на транзисторі інвертор.

В якості економічного рішення пропонується використання 16-розрядного мікроконтролера ATmega16-16AU (*Uchytel et al., 2018*). Ціна такого контролера – 444 грн. Його тактова частота (16 МГц) забезпечує швидкодію, достатню для обробки переривань і виконання розрахунків за час, який становить лише одиниці мікросекунд, що на порядки менше періоду сигналу ДКП навіть на максимальних швидкостях.

**Рисунок 4.** Технічні засоби для реалізації цифрового вимірювання швидкості

А, В – послідовність імпульсів, зрушена на 90 градусів,

сигнали А, В та І надходять на входи переривання

ДКП – датчик кута повороту, розміщений в енкодері

І – інвертор, П – приймач інформації про швидкість

ПК – послідовний канал

Вартість запропонованого рішення складає близько 450 грн (мікроконтролер та мінімальне обв'язування), що значно нижче вартості тахогенератора промислового виконання (від 3000 грн). Виключення тахогенератора також спрощує монтаж, знижує габарити шафи керування та підвищує надійність системи за рахунок зменшення кількості компонентів. У разі масового впровадження розрахунковий економічний ефект становить до 2500 грн на один привод.

Адаптивний алгоритм цифрового вимірювання швидкості

Практична реалізація запропонованого методу зниження методичної похибки вимагає розробки адаптивного алгоритму, який автоматично змінює базу вимірювання залежно від поточної швидкості обертання (*Zou & Zhang, (2020)*).

Принцип адаптивності

Ключовою особливістю розробленого алгоритму є автоматична зміна бази вимірювання для підтримання похибки в заданих межах у всьому діапазоні швидкостей. При перевищенні швидкістю певного порогового значення (наприклад, 400 об/хв для тихохідних механізмів) алгоритм автоматично переходить від вимірювання за один період до вимірювання за K послідовних періодів сигналу ДКП, що знижує методичну похибку в K разів.

Структура алгоритму

На рис. 5 представлена блок-схема адаптивного алгоритму ЦВШ, де використані наступні позначення:

СП – сигнал переривання, що генерується при виявленні переднього фронту сигналу енкодера;

П – ознака активного режиму вимірювання;

Л1 – лічильник тривалості періоду (заповнюється імпульсами з частотою 1 МГц);

α – регістр для зберігання виміряної тривалості періоду;

Л2 – лічильник кількості імпульсів ДКП у поточному циклі вимірювання;

N – константа, що визначає кількість імпульсів ДКП на один оберт.

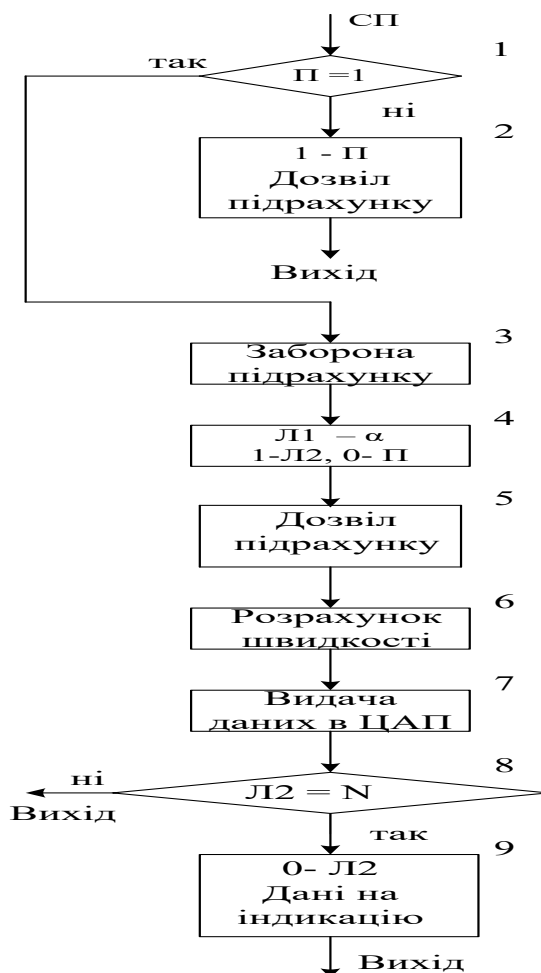


Рисунок 5. Блок-схема адаптивного алгоритму цифрового вимірювання швидкості

Опис роботи алгоритму

Алгоритм працює за наступною схемою:

Оператор ОП1 перевіряє стан ознаки П для визначення активності процесу вимірювання.

Оператор ОП2 активує режим вимірювання: встановлює ознаку $P = 1$ та дозволяє підрахунок імпульсів таймера в лічильнику Л1.

Оператор ОП3 зупиняє підрахунок імпульсів при надходженні наступного переднього фронту сигналу ДКП.

Оператор ОП4 виконує три дії: переносить вміст Л1 до регістра α , інкрементує лічильник Л2, обнуляє ознаку П для початку нового циклу.

Оператор ОП6 розраховує поточне значення швидкості за формулою (2а), використовуючи вимірний період з регістра α .

Оператор ОП8 перевіряє, чи досягнута необхідна база вимірювання (K періодів), та приймає рішення про завершення циклу або продовження накопичення даних.

Адаптивний вибір бази вимірювання

Для забезпечення стабільної похибки в усьому діапазоні швидкостей алгоритм використовує динамічний параметр K -- кількість періодів ДКП для одного виміру. При низьких швидкостях (до порогового значення) $K = 1$, що забезпечує мінімальну динамічну похибку. При підвищенні швидкості понад порогове значення K автоматично збільшується до 2 або більше, що зменшує методичну похибку пропорційно K .

Результати верифікації алгоритму, наведені в табл. 1, підтверджують ефективність адаптивного підходу: при вимірюванні за два послідовні імпульси ДКП ($K = 2$) методична похибка знижується вдвічі порівняно з традиційним методом ($K = 1$).

Обчислювальна складність

Запропонований алгоритм характеризується низькою обчислювальною складністю, оскільки основні операції зводяться до:

- підрахунок імпульсів (апаратна функція таймера);
- одного ділення для розрахунку швидкості за формулою (5);
- порівняння для перевірки умов ОП1 та ОП8.

Час виконання програмного циклу на 16-розрядному мікроконтролері з тактовою частотою 16 МГц становить одиниці мікросекунд, що на три порядки менше мінімального періоду сигналу ДКП навіть при максимальних швидкостях обертання.

Таким чином, розроблений адаптивний алгоритм забезпечує високу точність вимірювання швидкості обертання в широкому діапазоні при мінімальних обчислювальних витратах, що робить його придатним для реалізації на економічних мікроконтролерних платформах.

Висновки (Conclusions)

1. Проведено детальний аналіз джерел похибок (методичної та динамічної) при цифровому вимірі швидкості обертання валу за сигналом енкодера. Отримано аналітичні вирази (3) та (4) для їх оцінки.
2. Методом математичного моделювання доведено, що для тихохідних механізмів ($n < 100$ об/хв) переважною є динамічна похибка, а для швидкохідних ($n > 100$ об/хв) – методична.
3. Запропоновано та верифіковано розрахунками ефективний метод зниження методичної похибки в діапазоні високих швидкостей шляхом адаптивного збільшення бази вимірювання (використання K послідовних періодів імпульсів ДКП). Результатами розрахунків підтверджено зниження похибки в K разів.
4. Розроблена та обґрунтована економічна апаратна реалізація системи ЦВШ на базі мікроконтролера ATmega16, що забезпечує поєднання функцій вимірювання положення та швидкості в єдиному енкодері що дає змогу вилучити тахогенератор зі схеми контролю. Розрахунковий економічний ефект становить до 2500 грн на один привод, що за масового впровадження забезпечує значне зниження вартості систем автоматизації.

5. Розроблено адаптивний алгоритм цифрового вимірювання швидкості з автоматичним вибором бази вимірювання (параметр K), що забезпечує стабільну похибку в усьому діапазоні швидкостей при мінімальних обчислювальних витратах.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем керування електроприводами у металургії та інших галузях промисловості.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація, Х. В. та Л.О.; формальний аналіз, Х.В.; Методологія, Л.О та Х. В.; візуалізація, Л. Ю та М.Є.; оригінальна чернетка Л.О та Л.Ю.; перегляд і редагування, Х.В. та М.Є. Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Ali, H., Aslam, F., & Ferreira, P. (2021). Modeling Dynamic Multifractal Efficiency of US Electricity Market. *Energies*, 14(19), 6145. <https://doi.org/10.3390/en14196145>
- Aloui, C., & Mabrouk, S. (2010). Value-at-risk estimations of energy commodities via long-memory, asymmetry and fat-tailed GARCH models. *Energy Policy*, 38(5), 2326–2339. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.020>
- Bielinskyi, A. O., Khvostina, I., Mamanazarov, A., Matviychuk, A., Semerikov, S., Serdyuk, O., Solovieva, V., & Soloviev, V. N. (2021b). Predictors of oil shocks. Econophysical approach in environmental science. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 628(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/628/1/012019>
- Fang, W., Gao, X., Huang, S., Jiang, M., & Liu, S. (2018). Reconstructing time series into a complex network to assess the evolution dynamics of the correlations among energy prices. *Open Physics*, 16(1), 346–354. <https://doi.org/10.1515/phys-2018-0047>
- Hussain, S. I., Nur-Firyal, R., & Ruza, N. (2021). Linkage transitions between oil and the stock markets of countries with the highest COVID-19 cases. *Journal of Commodity Markets*, 100236. <https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2021.100236>
- Joo, K., Suh, J. H., Lee, D., & Ahn, K. (2020). Impact of the global financial crisis on the crude oil market. *Energy Strategy Reviews*, 30, 100516. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100516>
- Kassouri, Y., Bilgili, F., & Kuşkaya, S. (2022). A wavelet-based model of world oil shocks interaction with CO2 emissions in the US. *Environmental Science & Policy*, 127, 280–292. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.10.020>
- Xu, H., Wang, M., & Yang, W. (2020). Information Linkage between Carbon and Energy Markets: Multiplex Recurrence Network Approach. *Complexity*, 2020, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2020/5841609>
- Zebende, G. (2011). DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 390(4), 614–618. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.10.022>
- Zou, S., & Zhang, T. (2020). Cross-correlation analysis between energy and carbon markets in China based on multifractal theory. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15(3), 389–397. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa010>