

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТРИГУБА ВІКТОР ЮРІЙОВИЧ

УДК 338.45:[005.336.1:502.131.1]

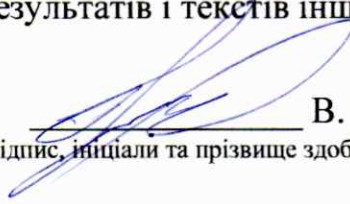
ДИСЕРТАЦІЯ

**Забезпечення економічної ефективності діяльності малих і середніх
промислових підприємств на засадах сталого розвитку**

051 «Економіка»
05 «Соціальні та поведінкові науки»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 В. Ю. Тригуба
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник -
Міщук Галина Юріївна, доктор
економічних наук, професор

Рівне - 2026

АНОТАЦІЯ

Тригуба В. Ю. Забезпечення економічної ефективності діяльності малих і середніх промислових підприємств на засадах сталого розвитку. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 051 «Економіка» (галузь знань 05 «Соціальні та поведінкові науки»). - Національний університет водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України, Рівне, 2026.

Роботу виконано в Національному університеті водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України, у якому і відбудеться захист.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального наукового завдання - розвитку теоретико-методичних та прикладних засад забезпечення економічної ефективності діяльності малих і середніх промислових підприємств (МСПП) на засадах сталого розвитку (на прикладі виробництва алюмінію). Метою дослідження є розвиток теоретико-методичних засад та розроблення прикладного інструментарію забезпечення економічної ефективності діяльності МСПП на засадах сталого розвитку. Об'єктом дослідження є процес забезпечення економічної ефективності діяльності малих і середніх промислових підприємств на засадах сталого розвитку, а предметом - теоретико-методичні та прикладні засади оцінювання й забезпечення такої ефективності для енергоємних МСПП алюмінієвої галузі.

У першому розділі «Теоретико-методологічні основи дослідження ефективності діяльності підприємств з позицій сталого розвитку» набув подальшого розвитку понятійний апарат дослідження економічної ефективності енергоємного МСПП у контексті сталого розвитку: поняття економічної ефективності енергоємного МСПП уточнено як інтегральну характеристику результативності господарської діяльності, що відображає співвідношення економічних результатів до витрачених ресурсів за умови дотримання екологічних обмежень і соціальної відповідальності та здатності зберігати цю результативність

у довгостроковій перспективі. На основі систематичного бібліометричного аналізу баз Scopus і Web of Science Core Collection (картографування засобами VOSviewer) обґрунтовано, що економічна ефективність енергоємного МСПП має подвійну природу - є одночасно результатом і складовою сталого розвитку. Удосконалено методичний підхід до інтегрального оцінювання економічної ефективності МСПП, що базується на авторській системі критеріїв і, на відміну від класичного триблокового ESG-підходу, передбачає виокремлення економічної складової (Econ) у самостійний блок і багаторівневе агрегування часткових показників, а також обґрунтовано проблеми та пріоритети декарбонізації МСПП.

У другому розділі «Тенденції та проблеми забезпечення економічної ефективності підприємств на засадах сталого розвитку (на прикладі виробництва алюмінію)» набули подальшого розвитку методичні засади оцінювання та прогнозування сталого розвитку галузі на основі роздільного таксономічного аналізу за економічним, екологічним і соціальним блоками та економіко-математичного моделювання. Роздільний таксономічний аналіз за 2019-2022 рр. засвідчив зростання інтегрального показника сталого розвитку галузі з 0,056 до 0,387 за збереження міжсферової неоднорідності: економічний блок продемонстрував найвищі значення (від 0,177 до 0,501), а екологічний - найнижчі (від 0,083 до 0,350). Прогнозування за моделлю ARIMA(2,1,2) на ряді галузевих викидів 2005-2023 рр. виявило стабілізацію сукупних викидів CO₂ без суттєвого абсолютного скорочення, що кількісно обґрунтовує потребу у випереджальному впровадженні заходів декарбонізації. Оцінено резерви підвищення сталого економічного розвитку МСПП із застосуванням методів операційного менеджменту.

У третьому розділі «Науково-методичні та прикладні засади забезпечення економічної ефективності малих і середніх промислових підприємств алюмінієвої галузі на засадах сталого розвитку» удосконалено науково-методичний підхід до багатокритеріального оцінювання та ранжування альтернатив розвитку МСПП, який виокремлює економічну складову (Econ) у самостійний блок і передбачає формування інтегрального індексу IESG-E (зважена згортка нормалізованих

критеріїв Econ, E, S, G) з визначенням вагових коефіцієнтів (0,40; 0,30; 0,15; 0,15) методом експертних оцінок із перевіркою узгодженості за коефіцієнтом конкордації Кендалла. Набув подальшого розвитку процесний підхід до забезпечення економічної ефективності МСПП з урахуванням енергоефективності та циркулярності виробництва на основі інтегрального індексу утилізаційної ефективності (IIUE) і сценарного моделювання структури сировини: перехід від міксу 40/60 до 20/80 (первинний/вторинний алюміній) знижує вуглецеву інтенсивність продукції з 5,10 до 2,80 тCO₂e/т і забезпечує економію вуглецевих платежів близько 115 тис. USD/рік за обсягу виробництва 1000 т/рік. Удосконалено підходи до підтримки впровадження ESG-E-звітності МСПП на основі процедури моніторингу, звітування та верифікації (MRV), інституційної архітектури розподілу функцій та інструментів стимулювання звітності, узгоджених із ресурсними обмеженнями МСПП і досягнутим рівнем ESG-E-відповідності.

Результати дослідження впроваджено в діяльність територіального відділення ВГО «Асоціація платників податків України» в Рівненській області (довідка № 07-049 від 08.04.2026) та в науково-аналітичну діяльність Центру соціологічних досліджень (Centre of Sociological Research, м. Щецин, Польща; сертифікат № 2-03 від 25.03.2026). За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць.

Ключові слова: економічна ефективність, енергоефективність, енергоємність, вуглецевий слід, малі та середні промислові підприємства, сталий розвиток, ESG-звітність, циркулярна економіка.

ABSTRACT

Tryhuba V. Yu. Ensuring the economic efficiency of small and medium-sized industrial enterprises on the principles of sustainable development. - Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 051 “Economics” (field of knowledge 05 “Social and Behavioural Sciences”). - National University of Water and Environmental Engineering of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Rivne, 2026.

The thesis was carried out at the National University of Water and Environmental Engineering of the Ministry of Education and Science of Ukraine, where the defence will take place.

The thesis addresses a relevant scientific task - developing the theoretical-methodological foundations and applied tools for ensuring the economic efficiency of small and medium-sized industrial enterprises (SMEs) on the principles of sustainable development, using aluminium production as a case study. The aim of the study is to develop the theoretical-methodological foundations and applied tools to ensure SMEs' economic efficiency in line with the principles of sustainable development. The object of the study is the process of ensuring the economic efficiency of small and medium-sized industrial enterprises on the principles of sustainable development, and the subject is the theoretical-methodological and applied foundations for assessing and ensuring such efficiency for energy-intensive SMEs in the aluminium industry.

In the first chapter, “Theoretical and methodological foundations of studying enterprise performance from a sustainability perspective”, the systematisation of scholarly approaches and the study's conceptual apparatus were further developed: the economic efficiency of an energy-intensive SME is refined as an integral characteristic of business performance that relates economic results to the resources spent while complying with environmental constraints and social responsibility and preserving this performance in the long run. Based on a bibliometric analysis of the Scopus and Web of Science Core Collection databases (mapping with VOSviewer), it is substantiated that the economic efficiency of an energy-intensive SME has a dual nature - being both a result

and a component of sustainable development. The criteria system and the methodological approach to the integral assessment of SMEs' economic efficiency were improved: unlike the classical three-block ESG approach, they separate the economic component (Econ) into a distinct (fourth) block and apply multi-level aggregation of partial indicators; the problems and priorities of SME decarbonisation are also substantiated.

In the second chapter, “Trends and problems of ensuring enterprises' economic efficiency on the principles of sustainable development (the case of aluminium production)”, the methodological foundations for assessing and forecasting the industry's sustainable development were further developed through separate taxonomic analysis across the economic, environmental and social dimensions and economic-mathematical modelling. The separate taxonomic analysis for 2019-2022 showed an increase in the industry's integral sustainability index from 0.056 to 0.387, with persistent cross-dimensional heterogeneity: the economic block reached the highest values (from 0.177 to 0.501), and the environmental block the lowest (from 0.083 to 0.350). Forecasting with an ARIMA(2,1,2) model on the 2005-2023 series of industry emissions revealed a stabilisation of total CO₂ emissions without a significant absolute reduction, thereby quantitatively justifying the need for proactive implementation of decarbonisation measures. The reserves for improving SMEs' sustainable economic development were assessed using operations management methods.

In the third chapter, “Scientific-methodological and applied foundations for ensuring the economic efficiency of small and medium-sized industrial enterprises in the aluminium industry on the principles of sustainable development”, the scientific-methodological approach to the multi-criteria assessment and ranking of SME development alternatives was improved: it separates the economic component (Econ) into a distinct block and forms the integral index IESG-E (a weighted convolution of normalised Econ, E, S, G criteria) with weights (0.40; 0.30; 0.15; 0.15) determined by expert assessment and verified by Kendall's coefficient of concordance. The process-based approach to ensuring SMEs' economic efficiency, accounting for energy efficiency and production circularity, was further developed on the basis of the integral utilisation-efficiency index (IIUE) and scenario modelling of the raw-material structure: shifting

from a 40/60 to a 20/80 mix (primary/secondary aluminium) reduces the product's carbon intensity from 5.10 to 2.80 tCO₂e/t and yields savings on carbon payments of about USD 115 thousand per year at an output of 1000 t/year. The approaches to supporting ESG-E-reporting implementation for SMEs were improved through monitoring, reporting and verification (MRV) procedures, an institutional architecture for distributing functions and reporting-incentive instruments aligned with SMEs' resource constraints and the achieved level of ESG-E compliance.

The results of the study were implemented in the activities of the regional branch of the All-Ukrainian Public Organisation “Association of Taxpayers of Ukraine” in Rivne Oblast (reference No. 07-049 of 08.04.2026) and in the research and analytical activities of the Centre of Sociological Research (Szczecin, Poland; certificate No. 2-03 of 25.03.2026). The main results of the thesis are published in 11 scientific works.

Keywords: economic efficiency, energy efficiency, energy intensity, carbon footprint, small and medium-sized industrial enterprises, sustainable development, ESG reporting, circular economy.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав:

1. Halyna Mishchuk, Viktor Tryhuba. From Energy Intensity to Sustainability: An Analysis of Trends in the Aluminium Industry. *Vadyba Journal of Management*. 2024. Vol. 40, No. 2. P. 51 - 56. URL: <https://ltvk.lt/wp-content/vadyba/40-2/vadyba.2024.2.05.pdf> DOI:<https://doi.org/10.38104/vadyba.2024.2.05>. (особистий внесок - 0,5 д.а.).

Публікації у наукових фахових виданнях України:

2. Тригуба В. Ю. Можливості застосування методів операційного менеджменту у забезпеченні стійкого економічного розвитку ливарних підприємств. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Економічні науки. 2023. Вип. 3 (103). С. 287 - 300. URL:<https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/econ/article/view/1336> DOI:<https://doi.org/10.31713/ve3202327>. (0,75 д.а.).

3. Тригуба В. Ю. Концептуальні засади сталого розвитку: історичні витоки, сучасні виклики та перспективи впровадження. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Економічні науки. 2024. Вип. 4 (108). С. 322 - 331. URL: <https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/econ/article/view/1677> DOI: <https://doi.org/10.31713/ve4202429>. (0,6 д.а.).

4. Тригуба В. Ю. Прогнозування викидів CO₂ у алюмінієвому секторі за допомогою моделі ARIMA: аналіз ефективності та перспективи декарбонізації. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Економічні науки. 2025. Вип. 1 (109). С. 175 - 185. URL: <https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/econ/article/view/1629> DOI: <https://doi.org/10.31713/ve1202516>. (0,65 д.а.).

5. Тригуба В. Ю. Економіко-аналітична оптимізація процесу екструзії алюмінію на основі моделювання браку та енергоефективності. Вісник Львівського університету. Економічні науки. 2025. Вип. 69. С. 106 - 117. URL:

<https://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/economics/article/view/14093> DOI: <http://dx.doi.org/10.30970/ves.2025.69.0.6922>. (0,77 д.а.).

6. Міщук Г. Ю., Тригуба В. Ю. Інтегральне оцінювання та вибір альтернатив розвитку малих і середніх промислових підприємств на основі ESG-підходу. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2026. № 2. С. 371 - 376. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2026-352-49> . (особистий внесок - 0,5 д.а.).

Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Тригуба В. Ю. Стійкий розвиток підприємств з виробництва литих деталей: особливості та зв'язок з цілями сталого розвитку. Стратегії глобальної конкурентоспроможності: соціально-економічні виміри: збірник тез X Міжнародної науково-практичної конференції (м. Черкаси, 23.03.2023 р.). Черкаси, 2023. С. 83 - 85. URL: <http://surl.li/lluqq>. (0,1 д.а.).

8. Тригуба В. Ю. Концептуальні засади оцінки ефективності управління сталим розвитком. Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки: збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти (м. Рівне, 11 - 12.05.2023 р.). Рівне: НУВГП, 2023. С. 426 - 428. (0,1 д.а.).

9. Тригуба В. Ю. Управління стійким розвитком підприємств з виробництва литих деталей складної форми в Україні. Підприємництво та торгівля: сучасний стан та перспективи розвитку: збірник тез III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Луцьк, 18.05.2023 р.). Луцьк, 2023. С. 70. URL: <https://konfkafptl.lntu.edu.ua/index.php/KKPTLLNTU/issue/view/2/2>. (0,1 д.а.).

10. Тригуба В. Ю. Вплив декарбонізації алюмінієвої промисловості на розвиток туризму. Перспективи розвитку індустрії туризму і гостинності в Україні та світі: збірник тез I Міжнародної науково-практичної конференції (м. Луцьк, 2024 р.). Луцьк, 2024. С. 83 - 86. (0,1 д.а.).

11. Тригуба В. Ю. Використання технологій Індустрії 4.0 та 5.0 для зменшення вуглецевого сліду в сучасних бізнес-моделях алюмінієвого виробництва. Матеріали IX Міжнародної конференції УРСЕС (м. Харків, ДБТУ,

2025 р.). Харків, 2025. URL: <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2025/03/conf-06-07-03-25-progrv.pdf>. (0,1 д.а.).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ З ПОЗИЦІЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ	21
1.1. Еволюція та сучасні напрями наукового дискурсу щодо економічної ефективності підприємств на засадах сталого розвитку	21
1.2. Критерії оцінювання економічної ефективності МСПП з урахуванням їх сталого розвитку	45
1.3. Декарбонізація у забезпеченні економічної ефективності МСПП: проблеми та пріоритети.....	64
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	84
РОЗДІЛ 2. <u>ТЕНДЕНЦІЇ</u> ТА ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ НА ЗАСАДАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ (НА ПРИКЛАДІ ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЮ)	87
2.1. Тенденції розвитку алюмінієвої галузі в контексті врахування вимог сталого розвитку	87
2.2. Екологічний слід виробництва алюмінію: прогнозування викидів CO ₂ у світлі сучасних вимог декарбонізації економіки	99
2.3. Оцінка можливостей сталого економічного розвитку МСПП із застосуванням методів операційного менеджменту	110
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	120
РОЗДІЛ 3. <u>НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ</u> ТА ПРИКЛАДНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МАЛИХ І СЕРЕДНІХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ АЛЮМІНІЄВОЇ ГАЛУЗІ НА ЗАСАДАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ	122

3.1. Удосконалення оцінювання економічної ефективності МСПП з виробництва алюмінію для вибору альтернатив та пріоритетів розвитку підприємств.....	122
3.2. Економіко-математичне моделювання ESG-орієнтованого управління енергоефективністю та декарбонізацією МСПП.....	145
3.3. Інституційні та регуляторні підходи до сталого розвитку МСПП алюмінієвої галузі на основі ESG-звітності	155
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	175
ВИСНОВКИ.....	178
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	182
ДОДАТКИ.....	202

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МСПП - малі і середні промислові підприємства

ВДЕ - відновлювані джерела енергії

ЦСР - Цілі сталого розвитку

ESG - Environmental, Social, Governance - екологічне, соціальне та корпоративне управління

Econ, Env, Soc, Gov - економічний, екологічний, соціальний та управлінський блоки критеріїв

IESG-E - інтегральний індекс оцінювання альтернатив на засадах ESG з виокремленою економічною складовою

IIUE - інтегральний індекс утилізаційної ефективності (Integral Index of Utilization Efficiency)

CBAM - Carbon Border Adjustment Mechanism - механізм прикордонного вуглецевого коригування ЄС

MRV - Monitoring, Reporting, Verification - моніторинг, звітування та верифікація

KPI - Key Performance Indicators - ключові показники ефективності

LCA - Life Cycle Assessment - оцінювання життєвого циклу

ARIMA - Autoregressive Integrated Moving Average - авторегресійна інтегрована модель ковзного середнього

ACF / PACF - автокореляційна / часткова автокореляційна функція

ADF - Augmented Dickey-Fuller test - розширений тест Дікі-Фуллера

GHG - Greenhouse Gas - парникові гази

CO_{2e} - еквівалент діоксиду вуглецю

Scope 1, 2, 3 - обсяги викидів парникових газів за GHG Protocol

MACC - Marginal Abatement Cost Curve - крива граничних витрат на скорочення викидів

OEE - Overall Equipment Effectiveness - загальна ефективність обладнання

EOQ - Economic Order Quantity - економічний розмір замовлення

TBL - Triple Bottom Line - потрійний результат

GRI - Global Reporting Initiative

ESRS - European Sustainability Reporting Standards

TCFD - Task Force on Climate-related Financial Disclosures

IAI - International Aluminium Institute

ASI - Aluminium Stewardship Initiative

IEA - International Energy Agency - Міжнародне енергетичне агентство

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development - ОЕСР

LTIFR - Lost Time Injury Frequency Rate - частота травм із втратою працездатності

TRIR - Total Recordable Incident Rate - загальна частота реєстрованих інцидентів

ERP / MES - Enterprise Resource Planning / Manufacturing Execution System

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Забезпечення економічної ефективності малих і середніх промислових підприємств (МСПП) на засадах сталого розвитку належить до пріоритетних завдань сучасної економічної науки та практики. Його вагомість особливо зростає в контексті посилення декарбонізаційних вимог до діяльності суб'єктів господарювання енергоємних і екологічно чутливих галузей, зокрема й алюмінієвої. На тлі загальносвітових тенденцій розвитку циркулярної економіки та імплементації принципів сталого розвитку в діяльність підприємств, в Україні зберігаються істотні структурні деформації, недостатня диверсифікація джерел енергії та сировини, а також повільний розвиток механізмів підтримки модернізації промислових підприємств з урахуванням вимог сталого розвитку. Це звужує можливості економічного розвитку вітчизняних виробників, які, попри високу енерго- та вуглецемісткість, є водночас стратегічними постачальниками критично важливої сировини для забезпечення «зеленого» та цифрового переходу. Запровадження механізму прикордонного вуглецевого коригування ЄС (СВАМ) [113], посилення вимог до нефінансової (ESG) звітності [121] та цілей декарбонізації суттєво змінюють умови конкурентоспроможності, особливо для МСПП з обмеженими організаційними, кадровими та фінансовими ресурсами. Попри значний науковий доробок щодо економічної ефективності та корпоративної сталості, потребує подальшого розвитку формування цілісних теоретико-методичних та прикладних засад забезпечення ефективності МСПП енергоємного сектору з урахуванням специфіки їхньої діяльності та необхідності інтеграції засад сталого розвитку у загальну систему управління. Необхідність розв'язання цієї науково-практичної суперечності, її високе значення для поствоєнного відновлення промисловості України зумовили вибір теми дисертаційного дослідження, визначили його мету та об'єкт.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано на кафедрі трудових ресурсів і підприємництва Національного університету водного господарства та природокористування відповідно до плану науково-дослідних робіт у межах теми «Антикризове управління економічними

відносинами в умовах глобальних викликів» (№ державної реєстрації 0125U003951). Тему дисертації затверджено вченою радою НУВГП (протокол № 10 від 25.11.2022 р.) і скориговано вченою радою навчально-наукового інституту економіки та менеджменту (протокол № 3 від 25.11.2025 р.).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розвиток теоретико-методичних засад та розроблення прикладного інструментарію забезпечення економічної ефективності діяльності МСПП на засадах сталого розвитку (на прикладі виробництва алюмінію). Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- уточнити понятійний апарат дослідження економічної ефективності діяльності малих і середніх енергоємних промислових підприємств у контексті їх сталого розвитку;
- обґрунтувати методичний підхід до інтегрального оцінювання економічної ефективності МСПП;
- оцінити та здійснити прогнозування сталого розвитку алюмінієвої галузі та динаміку викидів CO₂ з метою врахування тенденцій зовнішнього середовища діяльності МСПП, що спеціалізуються на виробництві алюмінію;
- удосконалити діагностичний апарат багатокритеріального оцінювання та ранжування альтернатив управлінських рішень щодо сталого розвитку МСПП на засадах ESG-підходу;
- розробити процесний підхід забезпечення економічної ефективності діяльності МСПП з урахуванням впливу енергоефективності та циркулярності виробництва;
- удосконалити існуючі підходи до підтримки впровадження ESG-звітності для МСПП алюмінієвої галузі.

Об'єкт дослідження - процес забезпечення економічної ефективності діяльності малих і середніх промислових підприємств на засадах сталого розвитку.

Предмет дослідження - теоретико-методичні та прикладні засади (методи, моделі та інтегральні індекси) оцінювання й забезпечення економічної ефективності МСПП на засадах сталого розвитку (на прикладі виробництва алюмінію).

Методи дослідження. Теоретичною та методичною основою дисертації є праці вітчизняних і зарубіжних учених. Використано: систематичний бібліометричний аналіз баз Scopus і Web of Science Core Collection (аналіз спільної появи ключових слів) - для оцінювання стану наукового дискурсу; абстрактно-логічний метод і метод наукового узагальнення - для уточнення категорій; таксономічний метод - для роздільного оцінювання рівня сталого розвитку галузі за блоками; метод експертних оцінок із перевіркою узгодженості за коефіцієнтом конкордації Кендалла та аналізом чутливості - для визначення вагових коефіцієнтів; методи багатокритеріального оцінювання - для формування інтегрального індексу IESG-E; економіко-математичне моделювання, кореляційно-регресійний аналіз і модель ARIMA - для прогнозування викидів та моделювання процесів; сценарне моделювання та індекс утилізаційної ефективності (ІІУЕ) - для оцінювання впливу циркулярності; методи операційного менеджменту - для оцінювання мікрорівневих резервів; графічний і табличний методи - для візуалізації результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

Удосконалено:

- методичний підхід до інтегрального оцінювання економічної ефективності МСПП, що базується на авторській системі критеріїв, та, на відміну від класичного триблокового ESG-підходу, передбачає виокремлення економічної складової в самостійний блок і багаторівневе агрегування часткових показників. Такий підхід дає змогу врахувати особливості діяльності енергоємних МСПП та значення економічних чинників у формуванні можливостей реалізації цілей та пріоритетів сталого розвитку таких підприємств.

- діагностичний апарат багатокритеріального оцінювання та ранжування альтернатив управлінських рішень щодо сталого розвитку МСПП, який, в доповнення до наявних ESG-моделей, враховує економічну складову (Econ) і передбачає визначення інтегрального індексу IESG-E з використанням зваженої згортки нормалізованих значень критеріїв за напрямками сталого розвитку та вагових коефіцієнтів, визначених методом експертних оцінок. Це дає змогу

удосконалити процедури оцінювання, ранжування й обґрунтованого вибору альтернатив управлінських рішень з мінімальними витратами часу та ресурсів.

- підходи до підтримки впровадження ESG-Е-звітності МСПП з виробництва алюмінію з визначенням процедури моніторингу, звітування та верифікації (MRV), інституційної архітектури розподілу функцій та інструментами стимулювання впровадження звітності. На відміну від наявних підходів, орієнтованих на великий бізнес, в розробці враховані обмеження, характерні для МСПП, розмежовано рівні доступу до даних та запропоновано об'єктивні критерії узгодження інструментів державної підтримки з досягнутим рівнем ESG-відповідності. Це сприятиме декарбонізації промислового сектору, мінімізації адміністративного навантаження на бізнес та забезпеченню дотримання підприємствами екологічних вимог регуляторного середовища ЄС.

Набуло подальшого розвитку:

- понятійний апарат дослідження економічної ефективності енергоємного МСПП у контексті сталого розвитку, що в доповнення до традиційних підходів, які ґрунтуються на співвідношенні економічних результатів до витрачених на їх досягнення ресурсів, включає дотримання екологічних обмежень та забезпечення соціальної відповідальності. Це створює методологічну основу для розроблення системи критеріїв оцінювання, що інтегрує фінансово-економічні, екологічні та соціальні показники в єдиний концептуально-аналітичний базис.

- методичні засади оцінювання та прогнозування сталого розвитку алюмінієвої галузі із застосуванням таксономічного аналізу та економіко-математичного моделювання на засадах ARIMA за економічним, екологічним і соціальним вимірами. На відміну від існуючих, такий підхід дає змогу виявляти основні детермінанти та можливості розвитку галузі, оперативно аналізувати та прогнозувати зміни за основними напрямками сталого розвитку у зовнішньому середовищі діяльності МСПП для прийняття ефективних управлінських рішень щодо вдосконалення діяльності.

- процесний підхід забезпечення економічної ефективності діяльності МСПП алюмінієвої галузі з урахуванням впливу енергоефективності та циркулярності виробництва, що відповідає цілям сталого розвитку, базується на кількісному оцінюванні утилізаційної ефективності виробництва та сценарному моделюванні структури сировини (співвідношення первинного і вторинного алюмінію). Застосування цього підходу дає змогу підвищувати економічну ефективність за рахунок оптимізації діяльності підприємств з урахуванням їхніх ресурсних обмежень, пріоритетів та можливостей декарбонізації.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані система критеріїв, інтегральні індекси (IESG-E, IIUE) та інструменти оцінювання придатні для внутрішнього управлінського аудиту МСПП, обґрунтування рішень щодо декарбонізації й енергоефективності та узгодження діяльності з регуляторними вимогами ЄС, зокрема СВМ. Результати дослідження впроваджено в діяльність територіального відділення ВГО «Асоціація платників податків України» в Рівненській області (довідка № 07-049 від 08.04.2026) - для аналітичної роботи та консультативно-методичної допомоги підприємствам-членам щодо ESG-звітності й сталого розвитку, а також у науково-аналітичну діяльність Центру соціологічних досліджень (Centre of Sociological Research, м. Щецин, Польща; сертифікат № 2-03 від 25.03.2026) - для соціологічного моніторингу та порівняльного оцінювання готовності МСПП до декарбонізації та інтеграції ESG-звітності в країнах ЄС і Східного партнерства.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дослідження, представлені в дисертаційній роботі, одержані автором особисто, і знайшли відображення в його наукових публікаціях. Із наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертаційній роботі використано лише ті ідеї, положення та висновки, які є результатом власних досліджень автора.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертації доповідалися та обговорювалися на: Х Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегії глобальної конкурентоспроможності: соціально-економічні виміри» (м. Черкаси, 2023 р.); Міжнародній науково-

практичній конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти (м. Рівне, 2023 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Підприємництво та торгівля: сучасний стан та перспективи розвитку» (м. Луцьк, 2023 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку індустрії туризму і гостинності в Україні та світі» (м. Луцьк, 2024 р.); IX Міжнародній конференції УРСЕС (м. Харків, 2025 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, зокрема: 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у зарубіжних виданнях та 5 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 220 сторінок, основний текст - 163 сторінки. Список використаних джерел містить 193 найменування. Робота містить 36 таблиць і 20 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ З ПОЗИЦІЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

1.1. Еволюція та сучасні напрями наукового дискурсу щодо економічної ефективності підприємств на засадах сталого розвитку

Дослідження еволюції та сучасного стану наукового дискурсу щодо економічної ефективності підприємств на засадах сталого розвитку потребує репрезентативної й верифікованої інформаційної бази. З огляду на це, формуванню теоретико-методологічних засад дослідження передувало проведення системного бібліографічного пошуку.

Інформаційну базу бібліографічного аналізу склали дві провідні міжнародні наукометричні бази даних - Scopus (видавництво Elsevier) та Web of Science Core Collection (далі - WoS CC, компанія Clarivate Analytics). Вибір саме цих платформ обумовлений високим рівнем редакційного контролю якості індексованих видань, повнотою бібліографічних метаданих та можливістю експорту даних у форматах, придатних для подальшого опрацювання у спеціалізованому програмному забезпеченні бібліометричного аналізу. Використання двох незалежних баз замість однієї дає змогу зменшити систематичне зміщення, пов'язане з обмеженням і лише частковим охопленням джерел кожною окремою платформою, а також провести взаємне порівняння отриманих результатів.

Бібліографічний аналіз за кожною з баз здійснювався окремо: формувалися та опрацьовувалися дві самостійні вибірки (масив Scopus та масив WoS CC) без їх подальшого об'єднання у єдиний масив. Такий підхід обрано свідомо: він дає змогу, по-перше, коректно зіставити покриття предметного поля кожною базою, а по-друге, уникнути методологічних ускладнень, пов'язаних із дедублікацією записів, метадані яких у двох базах форматуються неоднаково.

Пошуковий запит формувався за єдиною (ідентичною для обох баз) стратегією, побудованою з двох тематичних блоків, поєднаних булевими операторами. Перший блок об'єднував оператором OR терміни «economic

efficiency» та «business performance» як альтернативні концептуальні позначення результативності господарської діяльності підприємства. Другий блок поєднував оператором OR терміни «sustainability» та «sustainable development» як взаємозамінні позначення сталого розвитку. Обидва блоки пов'язувалися оператором AND, що забезпечувало відбір документів, які належать одночасно до обох предметних площин. Структуру пошукового запиту узагальнено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Структура пошукового запиту для бібліографічного аналізу

Параметр	Зміст	Призначення
Блок 1	«economic efficiency» OR «business performance»	Концепт результативності господарської діяльності
Блок 2	«sustainability» OR «sustainable development»	Концепт сталого розвитку
Поєднання блоків	Блок 1 AND Блок 2	Відбір документів на перетині двох предметних площин
Пошукове поле (Scopus)	Keywords	Пошук за авторськими та індексованими ключовими словами
Пошукове поле (WoS CC)	Keyword Plus	Пошук за автоматично згенерованим індексом ключових термінів

Джерело: побудовано автором.

Слід зауважити, що пошукове поле «Keywords» у Scopus охоплює як авторські ключові слова, так і індексовані терміни, тоді як використаний у WoS CC індекс Keyword Plus формується автоматично на основі назв робіт, що цитуються у публікації. Відмінність у принципах формування цих полів є об'єктивним джерелом часткової розбіжності обсягів двох вибірок.

Хронологічні межі пошуку обмежено періодом 2010-2025 рр., що забезпечує охоплення сучасного етапу розвитку проблематики. Нижню межу обрано на рівні 2010 р. з огляду на те, що саме після світової фінансової кризи 2008-2009 рр. проблематика сталого розвитку підприємств набула вираженого прикладного та управлінського спрямування, а нефінансова (ESG) звітність почала інтенсивно інституціоналізуватися. За типом документів до аналізу залучено наукові статті, оглядові статті, матеріали конференцій, розділи книг, монографії та редакційні

матеріали. Усі зафіксовані параметри пошукового запиту (пошукові поля, ключові терміни, логічні оператори, хронологічні та типологічні фільтри) дозволяють повне відтворення вибірок іншими дослідниками. Сформовані таким чином масиви публікацій становлять емпіричну основу для бібліографічного аналізу, результати якого представлено далі.

Узагальнення масиву публікацій засвідчує стійке зростання дослідницької активності у предметному полі впродовж усього аналізованого періоду, що підтверджує його актуальність та дослідницьку привабливість і обґрунтовує доцільність обраного часового діапазону (рис. 1.1).

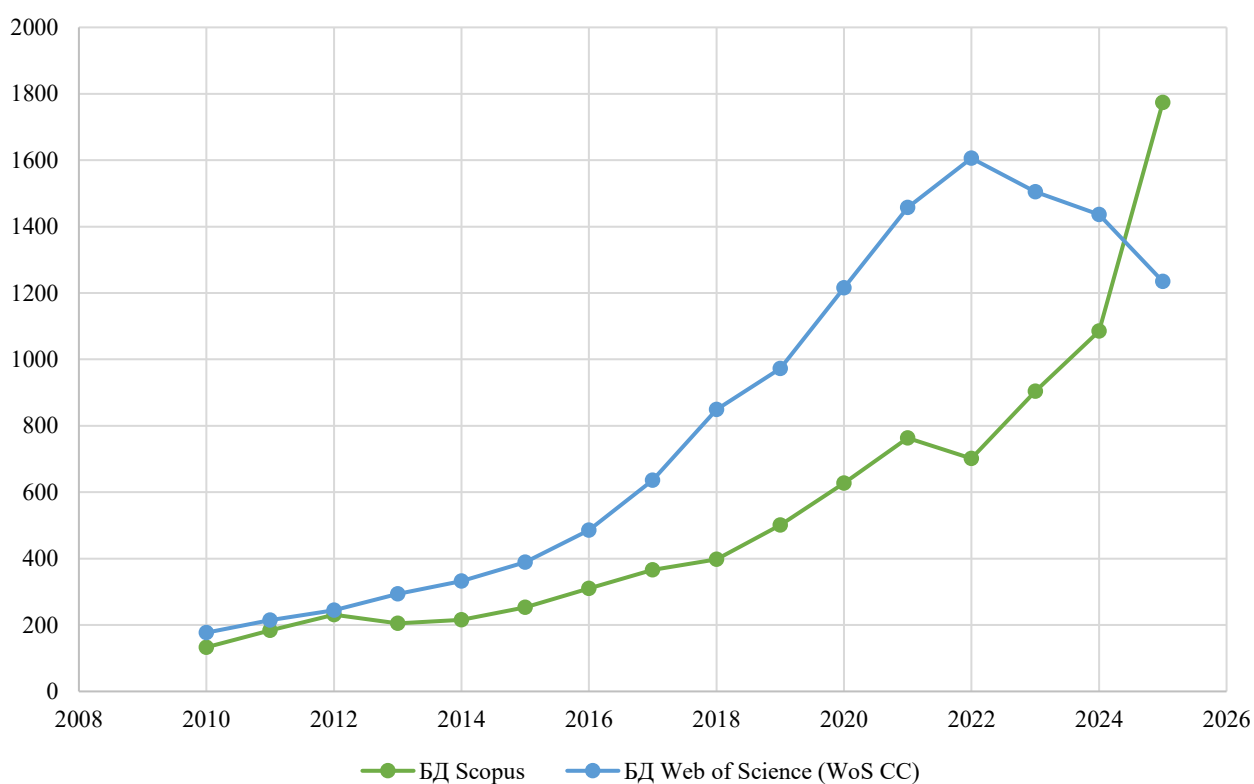


Рис. 1.1. Динаміка кількості публікацій за тематикою дослідження, 2010-2025 рр.
Джерело: побудовано автором за даними Scopus та Web of Science Core Collection.

Опрацювання сформованої інформаційної бази дає змогу простежити еволюцію наукового дискурсу та виокремити сучасні напрями досліджень. Становлення концепції сталого розвитку є результатом тривалого розвитку наукової думки та еволюції суспільної свідомості щодо меж економічного зростання і його екологічних та соціальних наслідків.

Поштовхом до формування екологічної парадигми стали праці дослідників, які одними з перших привернули увагу до негативних наслідків індустріалізації. Книга Р. Карсон (R. Carson) «Тиха весна» (1962) [1] засвідчила згубний вплив безконтрольного використання хімікатів на екосистеми та здоров'я людей і фактично стала стартовою точкою глобального екологічного руху. Подібні ідеї розвивав Б. Коммонер (B. Commoner), який сформулював «закони екології» та підкреслював неможливість безкінечного зростання в обмеженому середовищі [2], а також Д. Сузукі (D. Suzuki), який популяризував науково обґрунтовані підходи до збереження біорізноманіття [3]. Внесок цих дослідників полягав у формуванні науково обґрунтованої критики технократичної моделі розвитку, проте їхні роботи мали переважно макро- та суспільно-екологічний характер: вони не розробляли інструментарію оцінювання економічної ефективності господарюючих суб'єктів, зокрема МСПП, на основі показників вуглецевого сліду, енергоємності чи рівня циркулярності. Ця прогалина зберігається й нині та потребує подальшого методичного опрацювання на мікрорівні.

Ключовим етапом інституціоналізації концепції стала доповідь Світової комісії з навколишнього середовища і розвитку під головуванням Г. Х. Брундтланд (G. H. Brundtland) «Наше спільне майбутнє» (1987), де було сформульовано класичне визначення сталого розвитку як розвитку, що задовольняє потреби нинішнього покоління без шкоди для здатності майбутніх поколінь задовольняти власні потреби [4, с. 60]. Цей підхід уперше встановив нерозривний зв'язок між економічним зростанням, соціальною справедливістю та екологічною стійкістю. Водночас доповідь та подальші праці її авторів зосереджувалися переважно на рівні державної політики та глобального врядування; питання трансформації бізнес-моделей конкретних підприємств, зокрема малих і середніх промислового сектору, у логіці сталого розвитку залишилися лише окресленими, без деталізованого інструментарію оцінювання економічної ефективності з урахуванням ESG-факторів.

Подальший розвиток критики екстенсивного зростання та ресурсної виснажливості здійснила Д. Г. Медоуз (D. H. Meadows) зі співавторами у відомій

моделі «Межі зростання» [5]. Засобами системної динаміки автори продемонстрували роль обмежень ресурсної бази та циклів зворотного зв'язку між населенням, виробництвом, ресурсами й забрудненням, довівши необхідність довгострокового системного мислення та управління обмеженими ресурсами. Проте у цих роботах відсутні деталізовані підходи до розрахунку показників економічної ефективності на рівні окремих підприємств - у розрізі енергоємності, вуглецевої інтенсивності продукції чи рівня утилізаційної ефективності відходів виробництва.

Важливу роль у теоретичному оформленні корпоративного виміру сталого розвитку відіграв Дж. Елкінгтон (J. Elkington), який запропонував концепцію «потрійної результативності» (Triple Bottom Line) - одночасного оцінювання економічних, екологічних і соціальних результатів діяльності компаній [6]. Його внесок полягає у переорієнтації корпоративного управління від домінування фінансових показників до комплексного оцінювання впливу бізнесу на довкілля та суспільство. Водночас у цьому підході недостатньо деталізовано специфічні індикатори для МСПП (зокрема питомі викиди CO₂ на одиницю продукції, інтегровані індекси циркулярності чи комбіновані Lean та ESG показники результативності), що зумовлює потребу в подальшому розробленні прикладних моделей для конкретних галузей.

Суттєвий внесок у розвиток інституційного виміру сталого розвитку здійснив Дж. Сакс (J. Sachs), який акцентує увагу на інституційних та політичних аспектах, розробляючи стратегії «зеленого зростання» і подолання бідності [7]. Він визначає сталий розвиток як соціально інклюзивне та екологічно стійке економічне зростання і виокремлює управлінську складову як четвертий обов'язковий елемент, наголошуючи, що якість політичних інститутів та державних рішень має вирішальне значення для реалізації довгострокових цілей розвитку. Водночас питання адаптації таких макрорівневих стратегій до рівня мікроекономіки (особливо для МСПП у країнах з перехідною економікою) залишається відкритим і потребує розроблення моделей оцінювання ефективності інвестицій у декарбонізацію та циркулярність виробництва.

Соціальний вимір сталого розвитку суттєво розширено у працях, присвячених проблемам доступу до ресурсів, участі стейкхолдерів у прийнятті рішень та соціальної справедливості. Дослідження екофеміністського та справедливого вимірів доступу до ресурсів, гендерних аспектів управління природними ресурсами, а також аналіз динаміки нерівності та розподілу капіталу, здійснений Т. Пікетті (T. Piketty) [8], є концептуально важливими для розуміння соціальних передумов сталого розвитку. Проте ці підходи майже не торкаються питання економічної ефективності виробничих систем і МСПП, залишаючи відкритими питання вимірювання впливу соціальних інновацій на продуктивність, витрати та конкурентоспроможність підприємств.

Вагомий внесок у формування екологічної компоненти сталого розвитку та концепції соціо-екологічних систем зробили дослідники, які доводять, що стійкість соціально-економічних систем неможлива без урахування екосистемних обмежень та участі місцевих спільнот у прийнятті рішень [9]. Окремий напрям сформовано довкола практик «зеленого» бізнесу та ресурсоефективності: представники концепції природного капіталізму продемонстрували економічну доцільність енерго- та ресурсозбереження, наголошуючи на можливості зростання прибутковості бізнесу за рахунок зниження ресурсних витрат [10]. Проте у цих роботах питання побудови системних показників ефективності для конкретних промислових процесів подано здебільшого в загальному вигляді, без урахування специфіки МСПП та їхніх обмежених ресурсів.

У вітчизняній науковій думці ідеї гармонізації взаємовідносин людини і природи мають глибоке підґрунтя у працях В. І. Вернадського: концепція ноосфери розглядає людство як потужну геологічну силу, відповідальну за майбутнє біосфери [12]. Водночас ця спадщина має переважно філософсько-природничий характер і не містить розробленої економічної методології оцінювання ефективності виробництва під кутом зору вуглецевого сліду, енергоефективності чи циркулярності промислових процесів. Суттєвий внесок у розроблення концептуальних засад сталого розвитку в умовах трансформаційної економіки зробили українські науковці Б. Данилишин [12], В. Трегобчук [13], Л. Мельник

[14], С. Дорогунцов та О. Ральчук [15]. У їхніх роботах сталий розвиток трактується як процес функціонування суспільного виробництва, що забезпечує оптимальне співвідношення між економічним зростанням, якістю довкілля та збереженням потреб населення, а також як довгострокова траєкторія зростання суспільного добробуту на засадах соціально-економічної й техногенно-екологічної безпеки. Разом з тим зазначені дослідження, зосереджуючись на макро- та мезорівнях, лише окреслюють загальні рамки для підприємницького сектору і не пропонують деталізованої системи кількісних показників для оцінювання економічної ефективності саме МСПП.

Важливою віхою еволюції концепції стало ухвалення у 2015 р. документа «Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року» [16], у якому визначено 17 Цілей сталого розвитку (ЦСР) і 169 завдань [190], що формують цілісну систему орієнтирів для держав, бізнесу та громадянського суспільства. Для промислових підприємств, особливо МСПП, найбільш релевантними є ЦСР 7, 8, 9, 11, 12 і 13, що стосуються енергоефективності, інновацій, відповідального виробництва, низьковуглецевого розвитку та сталого міського середовища. Однак самі ЦСР не містять методичних приписів щодо трансформації технологічних та управлінських процесів на підприємствах і не визначають специфічних показників економічної ефективності для окремих галузей, що зумовлює необхідність адаптації цілей до галузевого та підприємницького рівнів.

Подальша конкретизація сталого розвитку на рівні бізнесу відбулася через розвиток концепцій корпоративної соціальної відповідальності та підходу ESG, який акцентує увагу на екологічних, соціальних та управлінських аспектах діяльності компаній. ESG-підхід сформував рамку оцінювання нефінансових результатів бізнесу, у межах якої важливу роль відіграють методологія розкриття показників Global Reporting Initiative (GRI), рекомендації Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) щодо розкриття кліматичних ризиків, стандарти систем екологічного та енергетичного менеджменту ISO 14001 та ISO 50001, а також галузеві ініціативи, зокрема Aluminium Stewardship Initiative (ASI).

Водночас зазначені підходи та стандарти переважно формують рамку звітності й управління нефінансовими ризиками, залишаючи у тіні питання глибинної трансформації виробничих моделей, пов'язаної з радикальним скороченням первинного споживання ресурсів.

Логічним продовженням еволюції сталих бізнес-підходів виступає концепція циркулярної економіки. Дослідження у цій сфері показали, що повторне використання, переробка, ремануфактура та енергетичне відновлення ресурсів є ключовими механізмами підвищення стійкості та зменшення екологічного навантаження в металоємних галузях [17]. Проте ці роботи зосереджені переважно на загальних бізнес-моделях циркулярної економіки і не дають розгорнутого інструментарію для вимірювання інтегрованої утилізаційної ефективності у конкретних технологічних процесах, таких як ливарне виробництво чи екструзія алюмінію на МСПП [188, 189]. Важливу роль у підвищенні ресурсоефективності відіграє концепція ощадливого виробництва (Lean): доведено, що усунення втрат, підвищення якості, скорочення простоїв і браку суттєво поліпшують економічні результати промислових підприємств [18]. Водночас класичний Lean зосереджується переважно на внутрішніх операційних показниках і лише частково враховує екологічні та соціальні аспекти, не формуючи повноцінної ESG-системи оцінювання; інтеграція Lean з ESG-підходом і цифровою аналітикою в енергоємних галузях досі залишається предметом окремих досліджень і не є достатньо теоретично узагальненою.

Узагальнення розглянутих наукових підходів дає змогу систематизувати внесок основних напрямів дослідження та виявлені прогалини (табл. 1.2).

Систематизація наукових підходів до сталого розвитку та виявлені прогалини

Напрямок / представники	Основний внесок	Виявлена прогалина
Екологічна критика зростання (Р. Карсон, Б. Коммонер, Д. Сузукі)	Обґрунтування екологічних меж зростання, критика технократичної моделі	Відсутність прикладних методик управління економічною ефективністю промислових підприємств
Макрорівнева рамка сталого розвитку (Г. Х. Брундтланд, Д. Медоуз, Дж. Сакс)	Інституціоналізація концепції, системне мислення, управлінська складова	Невирішеність питання адаптації принципів сталості до рівня МСПП
Корпоративний вимір та ресурсоефективність (Дж. Елкінгтон, концепція природного капіталізму)	«Потрійна результативність», економічна доцільність ресурсозбереження	Брак галузевих та розмірно-специфічних моделей оцінювання для МСПП
Соціально-розподільчий вимір (Т. Пікетті та ін.)	Аналіз нерівності, соціальної справедливості, доступу до ресурсів	Відсутність алгоритмів інтеграції соціальної складової у показники результативності виробництва
Українська наукова школа (В. І. Вернадський, Б. Данилишин, В. Трегубчук, Л. Мельник, С. Дорогунцов, О. Ральчук)	Теоретичне підґрунтя сталого розвитку в умовах трансформаційної економіки	Опрацювання переважно макро- та мезорівнів без кількісних індикаторів ефективності МСПП
Циркулярна економіка та Lean	Механізми замкнених матеріальних потоків, усунення виробничих втрат	Брак інтегрованих Lean+ESG+цифрових моделей та індексів циркулярності для МСПП

Джерело: побудовано автором.

Таким чином, наявний науковий доробок створює теоретичну основу для розуміння сутності сталого розвитку та його економічного, екологічного й соціального вимірів. Водночас проведений аналіз засвідчує наявність низки прогалин: недостатню розробленість інструментів оцінювання економічної ефективності діяльності малих і середніх промислових підприємств на засадах сталого розвитку, брак інтегрованих Lean, ESG та цифрових моделей, а також відсутність адаптованих до українських реалій індексів циркулярності й вуглецевої ефективності. Виявлені прогалини зумовлюють необхідність подальших

досліджень і визначають логіку наступних підрозділів роботи, у яких на основі сформованої інформаційної бази проводиться поглиблений бібліографічний аналіз публікаційного масиву окремо за базами Scopus та Web of Science Core Collection.

На основі описаної вище пошукової стратегії для аналізу за базою даних Scopus було сформовано окрему вибірку публікацій, обсяг якої склав 10903 документи. Поглиблений аналіз тематичної структури цього масиву проведено методом аналізу спільної появи ключових слів (keyword co-occurrence analysis) із побудовою карти наукового поля засобами програмного забезпечення VOSviewer. Картографування виконано за авторськими ключовими словами (Author Keywords) за умови мінімальної кількості появ терміна (min occurrences) на рівні 5; цьому порогу відповідають 20 термінів, які й формують карту. Обмеження аналізу авторськими ключовими словами забезпечує опору на терміни, безпосередньо визначені авторами публікацій, а застосований поріг відсікає поодинокі, нерепрезентативні позначення й гарантує відтворюваність карти. Цей метод дає змогу виявити приховану тематичну структуру предметного поля, визначити його центри та простежити взаємозв'язки між напрямками досліджень.

Сутність методу полягає в обчисленні частоти спільної появи термінів у межах одних і тих самих публікацій: чим частіше два ключові слова трапляються разом, тим тіснішим є зв'язок між ними і тим ближче вони розташовуються на карті. Кожне ключове слово на карті представлене вузлом, розмір якого пропорційний загальній вазі терміна (частоті появи та сумарній силі зв'язків), а лінії між вузлами відображають факт та інтенсивність спільної появи. Алгоритм кластеризації VOSviewer об'єднує тісно пов'язані терміни у тематичні кластери, що позначаються окремими кольорами.

Побудована карта спільної появи ключових слів за масивом Scopus наведена на рис. 1.2. Аналізована мережа охоплює 20 ключових слів, об'єднаних у 4 тематичні кластери; кількість зв'язків між термінами становить 122, а сумарна сила зв'язків (total link strength) - 194. Кожен кластер відображає відносно самостійний тематичний напрям у межах загального предметного поля «економічна ефективність - сталий розвиток».

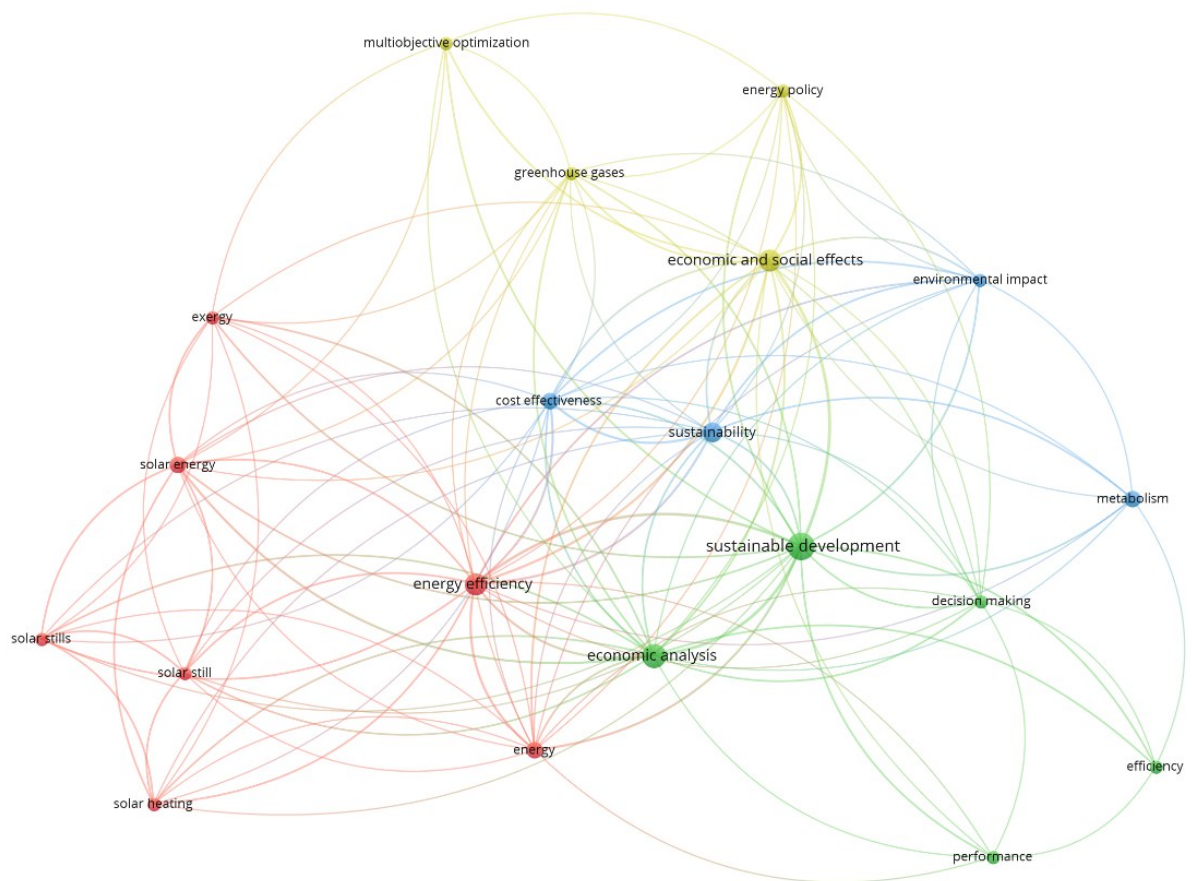


Рис. 1.2. Карта спільної появи ключових слів за масивом публікацій Scopus
Джерело: побудовано автором засобами VOSviewer за даними бази Scopus.

Узагальнену характеристику виявлених тематичних кластерів наведено в табл. 1.3.

Розподіл ключових слів за кластерами засвідчує, що предметне поле має чітку чотиривимірну структуру, у якій представлено технологічний, економіко-управлінський, еколого-економічний та політико-стратегічний напрями. Розглянемо кожен кластер детальніше.

Тематичні кластери карти спільної появи ключових слів (масив Scopus)

Кластер (колір)	К-сть	Ключові слова (англ.)	Ключові слова (укр.)	Коротка характеристика
Кластер 1 (червоний)	7	energy; energy efficiency; exergy; solar energy; solar heating; solar still; solar stills	енергія; енергоефективність; ексергія; сонячна енергія; сонячне нагрівання; сонячний дистилятор; сонячні дистилятори	Технологічно-енергетичний напрям: енергоефективність та ексергетичний аналіз геліотехнічних систем
Кластер 2 (зелений)	5	decision making; economic analysis; efficiency; performance; sustainable development	прийняття рішень; економічний аналіз; ефективність; результативність; сталий розвиток	Економіко-управлінський напрям: оцінювання ефективності та обґрунтування рішень для сталого розвитку
Кластер 3 (синій)	4	cost effectiveness; environmental impact; metabolism; sustainability	економічна доцільність; вплив на довкілля; метаболізм (ресурсний обмін); сталість	Еколого-економічний напрям: співвідношення витрат, екологічного впливу та сталості
Кластер 4 (жовтий)	4	economic and social effects; energy policy; greenhouse gases; multiobjective optimization	економічні та соціальні ефекти; енергетична політика; парникові гази; багатокритеріальна оптимізація	Політико-стратегічний напрям: енергетична політика, викиди та багатокритеріальна оптимізація

Джерело: побудовано автором.

Кластер 1 (червоний) - технологічно-енергетичний напрям. Найбільший за кількістю елементів кластер об'єднує сім ключових слів: energy (енергія), energy efficiency (енергоефективність), exergy (ексергія), solar energy (сонячна енергія), solar heating (сонячне нагрівання), solar still та solar stills (сонячний дистилятор / дистилятори). Цей кластер представляє технологічно-інженерну складову предметного поля і сфокусований на питаннях ефективності перетворення та використання енергії, передусім у геліотехнічних системах.

Смисловим ядром кластера виступає термін «energy efficiency», який є одним із найвагоміших вузлів усієї мережі: він має найбільший розмір серед елементів червоного кластера і виконує функцію містка до інших тематичних напрямів. Це свідчить про те, що енергоефективність є наскрізною категорією, яка пов'язує суто технологічні дослідження з економічними та екологічними. Присутність терміна

«exergy» вказує на застосування ексергетичного підходу - методу термодинамічного аналізу, що оцінює не лише кількість, а й якість (працездатність) енергії та широко використовується для виявлення втрат у енергетичних системах.

Помітна концентрація термінів, пов'язаних із сонячною енергетикою (solar energy, solar heating, solar still, solar stills), свідчить про те, що значна частина публікацій масиву присвячена дослідженню геліотехнічних установок, зокрема сонячних дистиляторів для опріснення та очищення води. Це вказує на технологічний та прикладний характер відповідного сегмента досліджень. З огляду на тематику нашого дослідження цей кластер є важливим тим, що демонструє: підвищення енергоефективності розглядається у науковій літературі насамперед на рівні конкретних технологічних рішень, тоді як зв'язок цих рішень з економічною ефективністю підприємства та потребує окремого опрацювання.

Кластер 2 (зелений) - економіко-управлінський напрям. Він об'єднує п'ять ключових слів: decision making (прийняття рішень), economic analysis (економічний аналіз), efficiency (ефективність), performance (результативність) та sustainable development (сталий розвиток). Цей кластер є економіко-управлінським ядром мережі і безпосередньо кореспондує з предметом дисертаційного дослідження.

Кластер містить два з трьох найвагоміших вузлів усієї карти - «sustainable development» та «economic analysis», які мають найбільші розміри і виступають центрами тяжіння не лише власного кластера, а й значної частини мережі загалом. Це засвідчує, що сталий розвиток у досліджуваному масиві концептуалізується переважно у зв'язці з економічним аналізом та оцінюванням ефективності, а не ізольовано. Присутність термінів «efficiency» та «performance» вказує на те, що результативність діяльності у відповідних публікаціях розглядається як вимірюваний об'єкт, а наявність терміна «decision making» на прикладну, управлінську орієнтацію цих досліджень.

Центральне розташування зеленого кластера на карті та його щільні зв'язки з усіма іншими кластерами мають важливе аналітичне значення: вони підтверджують, що економічний аналіз та оцінювання ефективності виконують інтегруючу функцію в предметному полі, поєднуючи технологічні (кластер 1),

еколого-економічні (кластер 3) та політико-стратегічні (кластер 4) дослідження. Водночас слід зауважити, що в цьому кластері відсутні терміни, які б вказували на специфіку МСПП: «economic analysis» та «performance» представлені в узагальненому вигляді. Це емпірично підтверджує сформульоване вище у цьому підрозділі положення про недостатню опрацьованість проблематики економічної ефективності саме МСПП.

Кластер 3 (синій) - еколого-економічний напрям. Об'єднує чотири ключові слова: cost effectiveness (економічна доцільність, витратна ефективність), environmental impact (вплив на довкілля), metabolism (метаболізм у значенні ресурсного обміну) та sustainability (сталість). Цей кластер відображає еколого-економічний вимір предметного поля: співвідношення між витратами, екологічним впливом та сталістю.

Ключовим для розуміння змісту кластера є поєднання термінів «cost effectiveness» та «environmental impact», яке засвідчує, що в досліджуваному масиві екологічний вплив розглядається не ізольовано, а у зв'язку з економічною доцільністю заходів з його зниження. Термін «metabolism» у цьому контексті відноситься до концепцій промислового та міського метаболізму - підходів, що аналізують потоки матеріалів та енергії у господарських системах і концептуально близькі до циркулярної економіки.

Розташування синього кластера у центральній частині карти, між зеленим та жовтим кластерами, свідчить про його сполучну роль: терміни «cost effectiveness» та «sustainability» виступають своєрідними «переходами» між економіко-управлінським та політико-стратегічним напрямками.

Кластер 4 (жовтий) - політико-стратегічний напрям. Об'єднує чотири ключові слова: economic and social effects (економічні та соціальні ефекти), energy policy (енергетична політика), greenhouse gases (парникові гази) та multiobjective optimization (багатокритеріальна оптимізація). Цей кластер представляє політико-стратегічний та макrorівневий вимір предметного поля.

Поєднання термінів «energy policy» та «greenhouse gases» вказує на те, що значна частина публікацій масиву розглядає енергоефективність та сталий

розвиток у контексті державної політики та проблематики скорочення викидів парникових газів. Присутність терміна «economic and social effects» засвідчує врахування соціально-економічних наслідків відповідних політик, що узгоджується з триединою (економіка - екологія - суспільство) логікою сталого розвитку. Уваги заслуговує термін «multiobjective optimization»: його наявність свідчить про застосування у відповідних дослідженнях методів багатокритеріальної оптимізації - математичного інструментарію пошуку компромісних рішень за наявності кількох суперечливих цілей. Присутність у предметному полі усталеного апарату багатокритеріальної оптимізації вказує на доцільність переходу від набору розрізнених критеріїв до інтегрального оцінювання. Розташування жовтого кластера у верхній частині карти та його зв'язки переважно із зеленим і синім кластерами відображають макрорівневий, політичний характер цього напрямку.

Таким чином, бібліографічний аналіз масиву Scopus засвідчив сформованість предметного поля та його структурованість навколо взаємозв'язку енергоефективності, економічного аналізу й сталого розвитку, водночас виявивши недостатню представленість проблематики саме МСПП.

Для поглиблення аналізу тематичної структури масиву Scopus доцільно розглянути найбільш цитовані публікації, які формують інтелектуальне ядро досліджуваного предметного поля. Високий рівень цитованості свідчить про їхній значний вплив на становлення сучасного наукового дискурсу щодо сталого розвитку, енергоефективності, сталих бізнес-моделей та організаційної результативності. Аналіз найбільш цитованих публікацій масиву Scopus засвідчує, що найбільший науковий вплив мають роботи, присвячені питанням енергетичного переходу, розвитку сталих бізнес-моделей, організаційної результативності та ресурсоефективності. При цьому домінуючим напрямом виступає проблематика енергоефективності та переходу до низьковуглецевої економіки. Перелік таких публікацій із показниками цитованості наведено в табл. 1.4.

Топ-5 найбільш цитованих статей масиву Scopus

№	Назва статті	Автор(и)	Джерело	Рік	Кількість цитувань
1	Opportunities and challenges for a sustainable energy future	S. Chu, A. Majumdar	Nature	2012	11473
2	The role of renewable energy in the global energy transformation	D. Gielen, F. Boshell, F. Saygin, N. Wagner, R. Gorini	Energy Strategy Reviews	2019	4364
3	A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes	N.M.P. Bocken, S.W. Short, P. Rana, S. Evans	Journal of Cleaner Production	2014	3310
4	Managing nitrogen for sustainable development	X. Zhang, E.A. Davidson, D.L. Mauzerall, P. Dumas, Y. Shen	Nature	2015	2587
5	Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art	Z. Ma, P. Cooper, D. Daly, L. Ledo	Energy and Buildings	2012	1100

Джерело: побудовано автором за даними бази Scopus.

Найбільш цитованою працею є дослідження С. Чу (S. Chu) та А. Маджумдара (A. Majumdar) «Opportunities and challenges for a sustainable energy future» (11473 цитування), у якому обґрунтовано роль чистої енергетики як базового чинника забезпечення довгострокового економічного розвитку та сталого функціонування суспільства. Автори акцентують увагу на перспективах сонячної, водневої та біоенергетики, а також визначають ключові виклики глобального енергетичного переходу [19].

Друге місце посідає стаття Д. Гілена (D. Gielen) та співавторів «The role of renewable energy in the global energy transformation» (4364 цитування), присвячена аналізу ролі відновлюваної енергетики у процесах декарбонізації світової економіки. Дослідження підкреслює значення енергоефективності, розвитку технологій сонячної та вітрової енергетики, а також необхідність трансформації регуляторної політики для досягнення цілей низьковуглецевого розвитку [20].

Значний вплив на розвиток корпоративного виміру сталого розвитку має праця Н. Бокен (N. M. P. Bocken) та співавторів «A literature and practice review to develop

sustainable business model archetypes» (3310 цитувань). У роботі запропоновано архетипи сталих бізнес-моделей, орієнтованих на підвищення ресурсоефективності, повторне використання ресурсів, впровадження циркулярних практик та інтеграцію екологічних принципів у бізнес-процеси підприємств [21].

Четверту позицію посідає стаття К. Чжана (X. Zhang) та співавторів «Managing nitrogen for sustainable development» (2587 цитувань), у якій розглядаються питання ефективного використання азоту в аграрному секторі та його впливу на екологічну стійкість і продовольчу безпеку. Робота акцентує увагу на взаємозв'язку між технологічними інноваціями, ресурсною ефективністю та досягненням Цілей сталого розвитку [22].

П'яте місце посідає оглядова стаття З. Ма (Z. Ma), П. Купера (P. Cooper), Д. Дейлі (D. Daly) та Л. Ледо (L. Ledo) «Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art» (1100 цитувань), присвячена систематизації методології та сучасного стану енергетичної модернізації (ретрофіту) наявних будівель. Автори обґрунтовують роль термомодернізації будівель як одного з ключових напрямів скорочення глобального енергоспоживання та викидів парникових газів і пропонують системний підхід до вибору, оцінювання та впровадження заходів підвищення енергоефективності [23].

Отже, аналіз найбільш цитованих публікацій Scopus свідчить, що сучасний науковий дискурс концентрується навколо чотирьох ключових напрямів: енергетичного переходу та декарбонізації, формування сталих бізнес-моделей, підвищення енергоефективності (зокрема енергетичної модернізації будівель) та ресурсоефективності виробничих систем. Водночас навіть серед найбільш впливових праць недостатньо представлені дослідження, присвячені оцінюванню економічної ефективності МСПП у контексті ESG, циркулярності та низьковуглецевої трансформації, що підтверджує актуальність тематики дисертаційного дослідження.

Для взаємної верифікації результатів та оцінювання їх стійкості до вибору наукометричної платформи аналіз спільної появи ключових слів, здійснений у

попередньому підрозділі для масиву Scopus, було проведено за тією самою методикою для окремо сформованої вибірки публікацій бази Web of Science Core Collection (далі - WoS CC). Параметри пошуку, програмне забезпечення (VOSviewer) та логіка інтерпретації карти залишалися незмінними, що забезпечує можливість співставлення отриманих результатів.

Побудована карта спільної появи ключових слів за масивом WoS CC наведена на рис. 1.3. Обсяг сформованого масиву WoS CC склав 14649 документів.

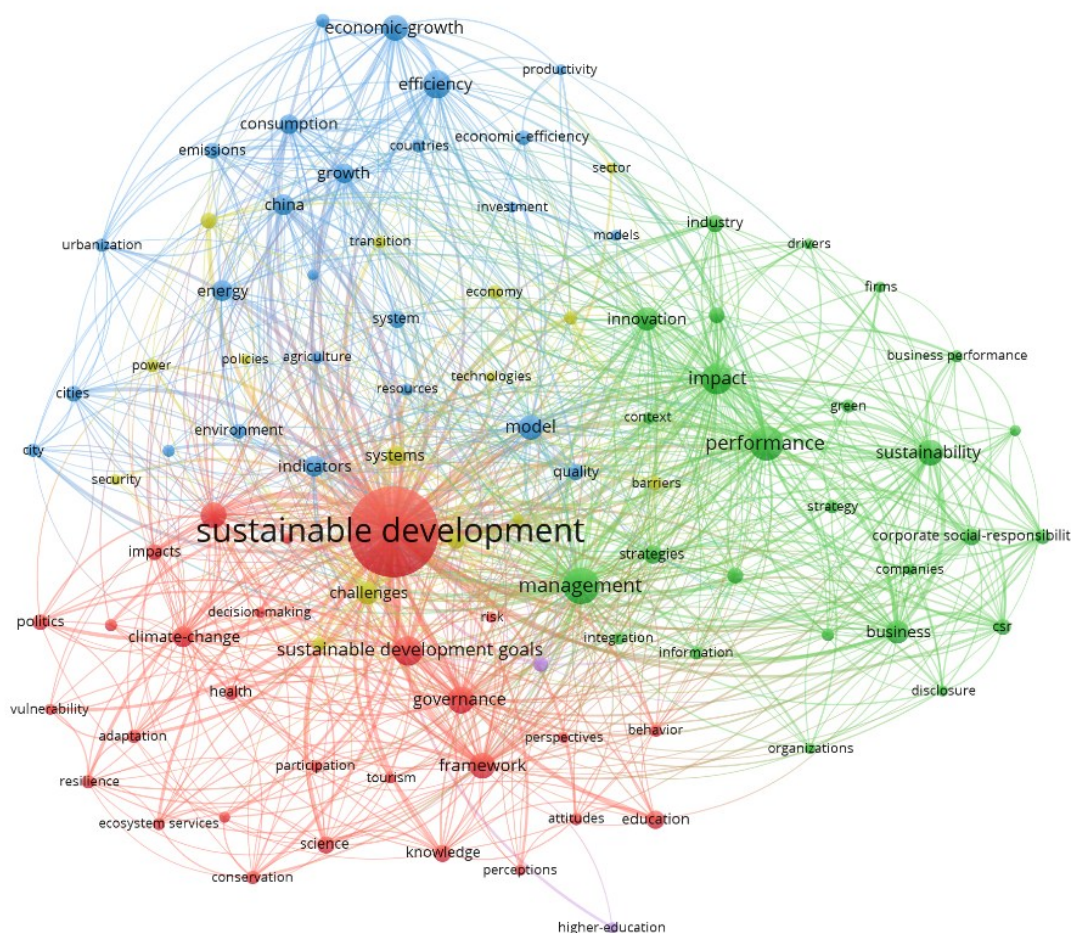


Рис. 1.3. Карта спільної появи ключових слів за масивом публікацій WoS CC

Джерело: побудовано автором засобами VOSviewer за даними бази WoS CC.

Аналізована мережа є суттєво більшою та деталізованішою, ніж карта Scopus: вона охоплює 96 ключових слів, об'єднаних у 5 тематичних кластерів. Більший обсяг мережі зумовлений насамперед тим, що карту за масивом Scopus побудовано

за авторськими ключовими словами (Author Keywords), тоді як за масивом WoS CC за полем Keyword Plus, яке формується автоматично на основі назв цитованих джерел і є значно ширшим за обсягом. Саме цей методологічний чинник, а не різниця в кількості документів двох вибірок, зумовлює відмінність у деталізації карт. Як і у випадку Scopus, кожен кластер відображає відносно самостійний тематичний напрям у межах загального предметного поля «економічна ефективність - сталий розвиток».

Узагальнену характеристику виявлених тематичних кластерів наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Тематичні кластери карти спільної появи ключових слів (масив WoS CC)

Кластер (колір)	К-сть	Ключові слова (англ.)	Ключові слова (укр.)	Коротка характеристика
Кластер 1 (червоний)	28	adaptation; attitudes; behavior; biodiversity; climate; climate-change; conservation; decision-making; ecosystem services; education; framework; governance; health; impacts; knowledge; participation; perceptions; perspectives; policy; politics; resilience; risk; science; sustainable development; tourism; vulnerability; water	адаптація; ставлення; поведінка; біорізноманіття; клімат; зміна клімату; збереження природи; прийняття рішень; екосистемні послуги; освіта; рамкові підходи; врядування; здоров'я; впливи; знання; участь; сприйняття; підходи; політика; політика (сфера); стійкість (резильєнтність); ризик; наука; сталий розвиток; туризм; вразливість; вода	Еколого-соціальний та врядувальний напрям: адаптація до зміни клімату, врядування, стійкість соціо-екологічних систем
Кластер 2 (зелений)	26	business; business performance; companies; context; corporate social-responsibility; csr; determinants; disclosure; drivers; financial performance; firm performance; firms; green; impact; implementation; industry; information; innovation; integration; management; organizations; performance; responsibility; strategies; strategy; sustainability	бізнес; бізнес-результативність; компанії; контекст; корпоративна соціальна відповідальність; КСВ; детермінанти; розкриття інформації; рушійні чинники; фінансова результативність; результативність фірми; фірми; «зелений»; вплив; впровадження; галузь; інформація; інновації; інтеграція; менеджмент; організації; результативність; відповідальність; стратегії; стратегія; сталість	Корпоративно-управлінський напрям: результативність бізнесу, КСВ, ESG-розкриття, стратегії сталості фірм

Кластер (колір)	К-сть	Ключові слова (англ.)	Ключові слова (укр.)	Коротка характеристика
Кластер 3 (синій)	25	agriculture; china; cities; city; co2 emissions; consumption; countries; dynamics; economic-development; economic-efficiency; economic-growth; efficiency; emissions; energy; environment; growth; indicators; investment; model; models; productivity; quality; resources; system; urbanization	сільське господарство; Китай; міста; місто; викиди CO ₂ ; споживання; країни; динаміка; економічний розвиток; економічна ефективність; економічне зростання; ефективність; викиди; енергія; довкілля; зростання; індикатори; інвестиції; модель; моделі; продуктивність; якість; ресурси; система; урбанізація	Макроекономіко-екологічний напрям: економічне зростання, ефективність, викиди CO ₂ , урбанізація
Кластер 4 (жовтий)	15	barriers; challenges; economy; future; opportunities; perspective; policies; power; renewable energy; sector; security; systems; technologies; technology; transition	бар'єри; виклики; економіка; майбутнє; можливості; перспектива; політики (заходи); енергія/влада; відновлювана енергія; сектор; безпека; системи; технології; технологія; перехід (трансформація)	Енергетично-трансформаційний напрям: енергетичний перехід, відновлювана енергетика, бар'єри та можливості
Кластер 5 (фіолетовий)	2	design; higher-education	дизайн (проектування); вища освіта	Освітній міні-напрямок: інтеграція сталого розвитку у вищу освіту

Джерело: побудовано автором.

Розподіл ключових слів засвідчує складнішу, ніж у масиві Scopus, тематичну структуру предметного поля: тут виокремлюються п'ять напрямів - еколого-соціальний, корпоративно-управлінський, макроекономіко-екологічний, енергетично-трансформаційний та освітній. Розглянемо кожен кластер детальніше.

Кластер 1 (червоний) - еколого-соціальний та врядувальний напрям. Цей найбільший кластер об'єднує 28 ключових слів і є еколого-соціальним центром мережі. До нього входять терміни, що характеризують адаптацію до зміни клімату (adaptation, climate, climate-change, vulnerability, resilience), збереження природи та екосистемні послуги (biodiversity, conservation, ecosystem services), а також соціально-врядувальну проблематику (governance, policy, politics, participation, decision-making, knowledge, education).

Смисловим центром кластера, а водночас і всієї мережі, виступає термін «sustainable development» - найбільший за розміром вузол карти, розташований у її центрі. Це засвідчує, що у масиві WoS CC сталий розвиток концептуалізується

насамперед у широкому еколого-соціальному та врядувальному контексті, а не у вузькоекономічному. Присутність термінів «resilience», «adaptation», «vulnerability» вказує на поширеність підходу соціо-екологічних систем, а наявність тематики «tourism», «health», «water» - на галузеву та секторальну деталізацію досліджень. Тож, цей кластер окреслює широкий контекст сталого розвитку, у межах якого економічна ефективність підприємства є лише однією зі складових.

Кластер 2 (зелений) - корпоративно-управлінський напрям. Об'єднує 26 ключових слів і сфокусований на результативності бізнесу та корпоративному вимірі сталого розвитку. Сюди входять терміни «business performance», «firm performance», «financial performance», «performance», що характеризують результативність підприємства, а також «corporate social-responsibility», «responsibility», «disclosure», що відображають проблематику корпоративної соціальної відповідальності та нефінансового розкриття інформації.

Центрами тяжіння кластера виступають терміни «performance», «management» та «sustainability» - вони мають найбільші розміри серед елементів зеленого кластера. Поєднання у межах одного кластера термінів результативності («financial performance», «firm performance») з термінами КСВ та розкриття інформації («csr», «disclosure», «responsibility») емпірично підтверджує, що у сучасному науковому дискурсі результативність підприємства та його соціально-екологічна відповідальність розглядаються у взаємозв'язку. Присутність термінів «determinants», «drivers», «implementation», «strategy» вказує на спрямованість досліджень на виявлення чинників та механізмів впровадження сталих практик на рівні фірм.

Кластер 3 (синій) - макроекономіко-екологічний напрям. Кластер об'єднує 25 ключових слів. До нього входять терміни економічного зростання та розвитку (economic-growth, economic-development, growth, productivity), терміни ефективності (efficiency, economic-efficiency), а також екологічні терміни (co2 emissions, emissions, environment) та терміни просторово-демографічного контексту (cities, city, urbanization, countries, china).

Особливе значення для нашого дослідження має присутність у цьому кластері термінів «economic-efficiency» та «CO₂ emissions» у безпосередній тематичній близькості. Це засвідчує сформованість дослідницької площини, у якій економічна ефективність розглядається у зв'язку з вуглецевими викидами. Водночас наявність терміна «indicators» вказує на поширеність індикаторного підходу до вимірювання, а присутність «economic-efficiency» саме на макрорівні (поряд з «economic-growth», «countries», «urbanization») знову підтверджує висновок про переважання макрорівневих досліджень та недостатню опрацьованість мікрорівня окремого підприємства, зокрема МСПП.

Кластер 4 (жовтий) - енергетично-трансформаційний напрям. Даний кластер об'єднує 15 ключових слів і представляє енергетично-трансформаційний вимір предметного поля. Його змістовим ядром є проблематика енергетичного переходу: терміни renewable energy, transition, technologies, technology, systems характеризують технологічну трансформацію енергетики, а терміни barriers, challenges, opportunities - аналіз перешкод та можливостей цього процесу.

Поєднання у межах одного кластера термінів «transition», «renewable energy» з термінами «barriers» та «challenges» свідчить про те, що значна частина публікацій масиву присвячена не лише технологічним аспектам енергетичного переходу, а й аналізу його обмежень. Цей кластер окреслює дослідницький контекст, у якому розглядаються переходи до низьковуглецевих технологій - процеси, що для промислових МСПП пов'язані з істотними бар'єрами.

Кластер 5 (фіолетовий) - освітній міні-напрям. Кластер є найменшим і об'єднує лише два ключові слова - «design» (проєктування) та «higher-education» (вища освіта). Попри малий обсяг, виокремлення цього кластера алгоритмом кластеризації є аналітично значущим: воно засвідчує наявність у предметному полі відносно автономного напрямку, присвяченого інтеграції принципів сталого розвитку у вищу освіту та проєктування освітніх програм. Його виокремлення радше підтверджує здатність застосованого методу виявляти навіть невеликі, тематично відокремлені сегменти масиву.

Зіставлення результатів аналізу двох масивів виявляє як спільні риси, так і відмінності. Спільним є те, що в обох базах смисловим центром предметного поля виступає сталий розвиток у тісній зв'язці з категоріями ефективності та результативності, а також те, що обидва масиви демонструють переважання макрорівневих досліджень за відсутності вираженого мікрорівневого (МСПП-орієнтованого) сегмента. Відмінності зумовлені насамперед обсягом та деталізацією мереж: карта WoS CC (96 термінів, 5 кластерів) є суттєво ширшою за карту Scopus (20 термінів, 4 кластери) і повніше представляє еколого-соціальний та енергетично-трансформаційний напрями, тоді як карта Scopus чіткіше виокремлює технологічно-енергетичний сегмент. Збіг ключових структурних висновків за двома незалежними базами даних свідчить про стійкість результатів бібліографічного аналізу та достовірність сформульованих на його основі висновків.

Для поглиблення розуміння інтелектуального ядра предметного поля доцільно проаналізувати найбільш цитовані праці, представлені у вибірці WoS CC. Висока цитованість публікацій свідчить про їхній визначальний вплив на формування сучасного наукового дискурсу та дає змогу ідентифікувати концептуальні напрями розвитку досліджень у сфері сталого розвитку, циркулярної економіки, декарбонізації та зеленої трансформації. Відповідні публікації з показниками цитованості систематизовано в табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Топ-5 найбільш цитованих статей масиву WoS CC

№	Назва статті	Автор(и)	Журнал	Рік	Кількість цитувань
1	The role of renewable energy in the global energy transformation	D. Gielen, F. Boshell, R. Gorini та ін.	Energy Strategy Reviews	2019	3480
2	Circular Economy: The Concept and its Limitations	J. Korhonen, A. Honkasalo, J. Seppälä	Ecological Economics	2018	2285
3	The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context	A. Murray, K. Skene, K. Haynes	Journal of Business Ethics	2017	1823

№	Назва статті	Автор(и)	Журнал	Рік	Кількість цитувань
4	Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries	G. Habert, S.A. Miller, K.L. Scrivener та ін.	Nature Reviews Earth & Environment	2020	1024
5	How does green finance affect green total factor productivity? Evidence from China	C.C. Lee, C. Lee	Energy Economics	2022	996

Джерело: побудовано автором за даними WoS CC.

Аналіз найбільш цитованих праць масиву WoS CC засвідчує, що інтелектуальне ядро предметного поля формується навколо чотирьох взаємопов'язаних напрямів: розвитку відновлюваної енергетики, концептуалізації циркулярної економіки, декарбонізації виробничих систем та впливу зелених фінансових механізмів на результативність економічної діяльності.

Найбільший вплив має праця Д. Гілена (D. Gielen) та співавторів «The role of renewable energy in the global energy transformation», яка посідає перше місце за кількістю цитувань (3480). У дослідженні обґрунтовується визначальна роль відновлюваної енергетики та енергоефективності у забезпеченні глобального енергетичного переходу й скороченні викидів парникових газів [20]. Висока цитованість цієї роботи підтверджує домінування енергетично-трансформаційного напрямку, що був виявлений у кластерному аналізі WoS CC.

Концептуальну основу циркулярної економіки формують праці Й. Корхонена (J. Korhonen), А. Хонкасало (A. Honkasalo) та Ю. Сеппяля (J. Seppälä), а також А. Мюррея (A. Murray), К. Скін (K. Skene) і К. Гейнса (K. Haynes), які сукупно мають понад 4 тис. цитувань. Ці дослідження розкривають сутність циркулярної моделі розвитку, її міждисциплінарний характер, переваги та обмеження. Водночас автори акцентують увагу переважно на макроекономічному та політичному рівнях аналізу, залишаючи недостатньо опрацьованими питання оцінювання економічної ефективності підприємств [24, 25].

Суттєву наукову увагу привертають також роботи, присвячені декарбонізації промисловості. Зокрема, стаття Ж. Абера (G. Habert) та співавторів досліджує

екологічні наслідки виробництва цементу і бетону та окреслює можливі стратегії скорочення викидів CO₂ у виробничих процесах [26]. Це підтверджує посилення інтересу до ресурсоефективності та низьковуглецевої трансформації промислових систем.

Окремий напрям представлений дослідженням Ч.-Ч. Лі (C. C. Lee) та Ч. Лі (C. Lee), присвяченим впливу зеленого фінансування на зелену сукупну факторну продуктивність. Отримані результати свідчать про поступове зміщення наукового інтересу від суто екологічних аспектів сталого розвитку до економічних механізмів забезпечення екологічної результативності [27].

Отже, аналіз найбільш цитованих публікацій підтверджує результати кластерного аналізу та засвідчує, що сучасний науковий дискурс у сфері сталого розвитку концентрується навколо питань енергетичного переходу, циркулярної економіки, декарбонізації виробництва та зеленого фінансування. Водночас навіть серед найбільш впливових праць практично відсутні дослідження, орієнтовані на оцінювання економічної ефективності малих і середніх промислових підприємств, що додатково підтверджує актуальність обраної тематики дисертації.

Таким чином, проведений за двома наукометричними базами бібліографічний аналіз засвідчив сформованість і структурованість предметного поля «економічна ефективність - сталий розвиток», його організованість навколо взаємозв'язку сталого розвитку, ефективності та корпоративної відповідальності, а також підтвердив недостатню представленість проблематики економічної ефективності саме малих і середніх промислових підприємств. Цей результат емпірично обґрунтовує актуальність та наукову новизну дисертаційного дослідження.

1.2. Критерії оцінювання економічної ефективності МСП з урахуванням їх сталого розвитку

Еволюція концепції сталого розвитку засвідчила перехід від вузького трактування ефективності як максимізації фінансового результату до інтегрованого

підходу, у межах якого економічні, екологічні, соціальні та управлінські параметри функціонування підприємства розглядаються як взаємопов'язані складові єдиної системи. Розроблення системи критеріїв оцінювання економічної ефективності, адекватної цьому підходу, потребує попереднього уточнення двох базових категорій: «економічна ефективність підприємства» та «сталий розвиток підприємства».

У класичній економічній науці економічна ефективність трактується як співвідношення отриманого результату та витрачених ресурсів і вимірюється переважно фінансово-виробничими показниками (рентабельністю, продуктивністю, оборотністю активів). Така інтерпретація, однак, не враховує екологічних та соціальних наслідків виробництва, які тривалий час залишалися поза межами економічного аналізу. Усвідомлення обмеженості суто фінансового підходу історично пов'язане з формуванням екологічної парадигми, поштовх якій дала, зокрема, праця Р. Карсона (R. Carson) , що вперше системно показала згубність безконтрольного промислового впливу на довкілля [1]. Подальший розвиток наукової думки привів до розуміння того, що довгострокова економічна життєздатність підприємства невіддільна від його екологічної та соціальної відповідальності.

Природа економічної ефективності та її трактування в науковій літературі мають тривалу історію розвитку. Витоки сучасного розуміння цієї категорії сягають праць класиків політичної економії. Д. Рікардо, який у роботі «Початки політичної економії та оподаткування» (1817) одним із перших застосував термін «ефективність» як співвідношення результату до витрат. Подальший розвиток концепції пов'язаний із теорією загальної рівноваги Л. Вальраса, оптимумом В. Парето, працями А. Пігу та Дж. Гелбрейта, а в контексті її кількісного вимірювання - з роботами М. Фаррелла (M. Farrell), який у 1957 р. заклав методологічні засади розмежування технічної та алокативної ефективності [30, 31].

У сучасному науковому дискурсі склалося кілька базових підходів до визначення сутності економічної ефективності підприємства. Ресурсно-витратний підхід, що домінує у вітчизняній економічній літературі, трактує економічну

ефективність як співвідношення отриманого результату (ефекту) до витрачених на його досягнення ресурсів [29, 34]. У межах цього підходу В. Г. Андрійчук визначає економічну ефективність як «таке співвідношення між результатами виробництва і ресурсами, при якому отримують вартісні показники ефективності виробництва», виокремлюючи три варіанти такого співвідношення: коли і ресурси, і результати виражені у вартісній формі; коли ресурси - у вартісній, а результати - у натуральній формі; коли ресурси - у натуральній, а результати - у вартісній формі [29].

Цільовий підхід, представлений працями Дж. Гелбрейта, інтерпретує економічну ефективність через здатність підприємства досягати поставлених цілей за умови раціонального використання наявних можливостей [33]. Близьким до нього є результативний підхід П. Друкера (P. Drucker) [117], який провів принципове розмежування між поняттями «ефективність» (efficiency - «робити речі правильно») та «результативність» (effectiveness - «робити правильні речі»), наголошуючи на пріоритетності правильного вибору стратегічних орієнтирів [116] перед оптимізацією витрат [33].

Принципово важливим є розмежування понять «ефект», «результат», «результативність» та «ефективність», які в науковій літературі часто вживаються як синонімічні, проте мають суттєві концептуальні відмінності. Результат доцільно розглядати як приріст або зменшення певного показника функціонування системи за визначений проміжок часу (обсяг виробленої продукції, прибуток підприємства тощо). Ефект є складнішим явищем, що відображає зміну сукупності результатів у часовому аспекті, та виступає сумарним показником. Результативність характеризує ступінь досягнення запланованого результату, тобто співвідношення фактичного й планового виходів. Ефективність же є відносною величиною, що отримується при зіставленні абсолютної величини ефекту з витратами або ресурсами, і характеризує, якою ціною досягнуто отриманих результатів [33, 36].

З методологічного погляду слід також розрізняти технічну та алокативну (економічну) ефективність, що походять від класичної декомпозиції М. Фаррелла. Технічна ефективність характеризує здатність підприємства отримувати максимально можливий обсяг продукції з наявного набору ресурсів і відображає

винятково фізичні співвідношення «вхід - вихід», тоді як алокативна ефективність відображає здатність використовувати ресурси у пропорціях, що мінімізують витрати з урахуванням цін факторів виробництва [30, 31]. Економічна ефективність у вузькому розумінні є добутком технічної та алокативної ефективності й, на відміну від технічної, передбачає врахування цінової (вартісної) інформації. Методологічно це означає, що оцінка економічної ефективності завжди передбачає звернення до системи цін - ринкових, тіньових або таких, що відображають суспільні переваги.

Водночас сучасна економічна наука долає обмеженість суто витратно-результатного трактування економічної ефективності, інтегруючи в неї багатовимірні аспекти господарської діяльності. На це звертає увагу Т. Батракова, визначаючи економічну ефективність як «якісну категорію, яка відображає глибокі процеси удосконалення, що відбуваються у всіх елементах виробничої та підприємницької діяльності» [35]. Принципово важливим у цьому контексті є концептуальне розширення категорії економічної ефективності, запропоноване у працях з теорії добробуту (Е. Мішан (E. Mishan), Н. Калдор (N. Kaldor), Дж. Гікс (J. Hicks), Т. Сцитовські (T. Scitovsky)), які довели неможливість строгого розмежування ефективності виробництва й розподілу результатів без урахування міжособистісних порівнянь добробуту [32]. Це теоретичне положення обґрунтовує необхідність комплексного підходу до оцінювання ефективності, що враховує не лише власне фінансово-економічні, а й соціальні та екологічні складові.

У контексті сталого розвитку категорія «економічна ефективність підприємства» зазнає суттєвої трансформації. Ю. Ємець наголошує, що економічна ефективність є основою конкурентоспроможності підприємства й має розглядатися як «комплексна характеристика, що відображає ступінь використання ресурсних витрат, спроможність досягати поставлених цілей та здатність до стійкої життєдіяльності у конкурентному ринковому середовищі» [37]. Таке трактування актуалізує часовий вимір ефективності - її поділ на статичну (короткострокову) та динамічну (довгострокову), де остання передбачає здатність підприємства підтримувати конкурентоспроможність протягом тривалого періоду за рахунок

гнучкого варіювання ресурсами, технологічного оновлення та адаптації до змін зовнішнього середовища. О. Петков, систематизуючи фактори впливу на економічну ефективність, виокремлює п'ять груп внутрішніх чинників: виробничі, економічні, організаційно-структурні, екологічні та інноваційні [38]. Включення екологічних та інноваційних факторів до базової системи детермінант економічної ефективності засвідчує концептуальний перехід від традиційного фінансово-виробничого тлумачення до інтегрованого розуміння, у якому економічна ефективність невіддільна від екологічної відповідальності та здатності до інноваційного оновлення. Еволюцію змісту поняття «економічна ефективність» подано на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Еволюція поняття «економічної ефективності».

Джерело: побудовано автором.

З огляду на викладене, у межах цього дослідження під економічною ефективністю підприємства в контексті сталого розвитку розуміється інтегральна характеристика результативності господарської діяльності суб'єкта господарювання, яка відображає співвідношення економічних результатів (доходу, прибутку, доданої вартості) до витрачених на їх досягнення ресурсів за умови

дотримання екологічних обмежень та забезпечення соціальної відповідальності, а також здатність підприємства зберігати та нарощувати цю результативність у довгостроковій перспективі. Таке визначення відповідає сучасній парадигмі сталого розвитку на мікрорівні й створює методологічну основу для розроблення системи критеріїв оцінювання, що інтегрує фінансово-економічні, екологічні та соціальні показники у єдину аналітичну рамку.

Сталий розвиток підприємства на мікрорівні розглядається як процес функціонування суб'єкта господарювання, що забезпечує оптимальне співвідношення між економічним зростанням, якістю довкілля та збереженням соціальних потреб [13, 14, 15, 28]. У вітчизняній науковій літературі цей підхід обґрунтовано, зокрема, у працях Б. Данилишина та інших дослідників національних стратегій сталого розвитку [28]. Стосовно промислових підприємств це означає, що економічна ефективність має оцінюватися не ізольовано, а як результат збалансованого поєднання фінансових, екологічних та соціальних цілей за умови належної якості управління.

Для МСПП, на прикладі виробництва алюмінію, що характеризуються високою енергоємністю процесів, значним вуглецевим слідом та суттєвим потенціалом циркулярної економіки, інтегрований підхід до оцінювання ефективності є особливо актуальним. Алюмінієве виробництво є репрезентативним сегментом для такого дослідження, оскільки поєднує високу енергоємність, значний вуглецевий слід, високотемпературні технології плавлення, значні обсяги вторинної сировини та потужний потенціал циркулярної економіки. Енергоємність металургійного виробництва є однією з найвищих серед галузей промисловості [39], що робить енергетичні та емісійні параметри визначальними для економічної ефективності таких підприємств.

Сталий розвиток МСПП можна визначити як такий стан і траєкторію функціонування, за яких забезпечується довгострокова економічна життєздатність підприємства, мінімізується негативний вплив виробництва на довкілля та гарантується належний рівень соціальної безпеки і добробуту працівників та місцевих громад. Для таких підприємств це передусім означає наявність:

- економічної складової - стабільна прибутковість, оптимізація собівартості, підвищення продуктивності обладнання, скорочення браку, підвищення гнучкості виробництва;
- екологічної складової - зменшення питомих енерговитрат, скорочення викидів парникових газів, контроль специфічних забруднювачів (оксидів азоту та сірки, пилу, фторидів), зниження обсягів і небезпечності шлаків та оксидних нашарувань, розвиток циркулярних практик;
- соціальної складової - безпечні умови праці в умовах високих температур, зниження травматизму, розвиток компетенцій персоналу, гідна оплата праці та низька плинність кадрів, конструктивна взаємодія з місцевими громадами;
- управлінської складової - наявність формалізованої політики сталого розвитку, впровадження систем менеджменту за стандартами ISO, забезпечення прозорості нефінансової звітності та дієвих механізмів залучення зацікавлених сторін.

Окремо слід наголосити на специфіці МСПП як суб'єктів оцінювання. На відміну від великих корпорацій, для яких розроблено розгалужені системи нефінансової звітності та ESG-рейтингування, МСПП мають обмежені організаційні, кадрові та фінансові ресурси для збору, обробки й верифікації великих масивів даних. Це означає, що система критеріїв, придатна для практичного застосування на МСПП, повинна відповідати додатковим вимогам:

- бути компактною (з обмеженою кількістю показників, що піддаються вимірюванню силами самого підприємства);
- спиратися переважно на дані первинного виробничого та фінансового обліку, а не на складні зовнішні оцінки;
- допускати поетапне впровадження - від базового набору показників до повної системи.

Саме тому пряме перенесення розгалужених корпоративних ESG-методик на МСПП є малоприматним, а розроблення адаптованої системи критеріїв становить самостійне наукове завдання [119].

Проблематика оцінювання ефективності підприємств з урахуванням екологічних та соціальних факторів широко представлена в сучасній науковій літературі, проте наявні підходи характеризуються фрагментарністю та недостатньою адаптованістю до специфіки МСПП. Систематизація доробку дає змогу виокремити кілька самостійних напрямів досліджень.

Перший напрям присвячено зв'язку між екологічними інноваціями та фінансовою результативністю підприємств. Зокрема, К. Гізетті (C. Ghisetti) та К. Реннінгс (K. Rennings) на основі емпіричного аналізу довели, що екологічні інновації, спрямовані на зниження ресурсо- та енергоспоживання, позитивно впливають на прибутковість підприємств, тоді як інновації, орієнтовані переважно на зниження зовнішніх викидів, такого ефекту не дають [40]. Цей результат є важливим аргументом на користь розгляду економічної та екологічної ефективності як взаємопов'язаних, а не конфліктних категорій.

Другий напрям стосується систем енергетичного менеджменту як інструменту підвищення ефективності енергоємних виробництв. Систематичний огляд М. Шульце (M. Schulze) та співавторів узагальнює наявні підходи до енергоменеджменту в промисловості та пропонує інтегративну концептуальну рамку, що пов'язує організаційні, технічні та поведінкові аспекти управління енергоспоживанням [41]. Для металургійних підприємств значний потенціал підвищення ефективності пов'язаний також з управлінням попитом на електроенергію [42] та автоматизацією контролю енергоспоживання із застосуванням адаптивних алгоритмів [43].

Третій напрям охоплює оцінювання екологічних результатів виробництва на основі методології аналізу життєвого циклу (LCA). Критичний огляд Г. Лю (G. Liu) та Д. Б. Мюллера (D. B. Müller) засвідчив, що, попри значну кількість LCA-досліджень алюмінієвої галузі, їм бракує методологічної узгодженості, а результати є слабо зіставними між собою [44]. Це обмежує можливість прямого використання LCA-оцінок як критеріїв ефективності та зумовлює потребу в розробленні узгоджених галузевих показників.

Четвертий напрям пов'язаний з вимірюванням результативності виробничих систем. Класичним інтегральним показником тут є загальна ефективність обладнання (OEE), методологію та роль якої в системах вимірювання продуктивності обґрунтовано у праці П. Йонссона (P. Jonsson) та М. Лессгаммара (M. Lesshammar) [45]. Водночас цей показник відображає переважно операційну ефективність і не охоплює екологічних та соціальних результатів.

Окремої уваги заслуговує доробок української наукової школи з оцінювання ефективності та сталого розвитку підприємств [118]. У вітчизняній літературі обґрунтовано доцільність переходу від однопланових фінансових показників до інтегральних оцінок, що поєднують економічну та соціальну складові на основі узагальнюючих індексів, побудованих із системи часткових показників із застосуванням методу експертних оцінок. Сучасні українські дослідження прямо пов'язують концепцію сталого розвитку із зеленою трансформацією економіки, наголошуючи, що інтеграція екологічної та соціальної відповідальності, формалізована через ESG-критерії, перестає бути репутаційною вимогою і стає вимірюваним чинником економічної ефективності підприємства [46]. Поряд з цим у вітчизняній науці активно розвиваються методичні підходи до оцінювання корпоративної соціальної відповідальності з використанням ESG-індикаторів та індексних методів [47]. Спільним для українського доробку є визнання потреби в інтегральних, багатовимірних оцінках; водночас більшість запропонованих підходів орієнтовані на великі підприємства або мають загальноекономічний характер і не враховують галузевої специфіки енергоємних МСПП.

Узагальнення розглянутих підходів засвідчує, що в науковій літературі ґрунтовно опрацьовано окремі групи показників (фінансові, енергетичні, екологічні, операційні, соціальні), проте бракує цілісної системи критеріїв, яка б:

- по-перше, інтегрувала всі чотири виміри сталого розвитку;
- по-друге, була адаптована до галузевої специфіки енергоємних МСПП;
- по-третє, розглядала економічну ефективність не як зовнішній результат, а як внутрішню складову сталого розвитку.

У сучасній практиці співіснують кілька рамок, що мають спільну мету: поєднати економічні, екологічні та соціальні аспекти діяльності, проте різняться за обсягом, ступенем формалізації та призначенням.

Концепція «потрійної результативності» (Triple Bottom Line, TBL), запропонована Дж. Елкінгтоном (J. Elkington) [6], ґрунтується на тривимірній моделі «люди - планета - прибуток» і має характер загальної управлінської філософії. Її перевагою є гнучкість, проте водночас і головне обмеження: TBL не задає стандартизованих метрик, залишаючи вибір показників за підприємством, унаслідок чого результати різних компаній є слабо зіставними [47].

Концепція ESG, що сформувалася пізніше, доповнює тривимірну логіку четвертим управлінським (governance) виміром і, на відміну від TBL, орієнтована на стандартизоване вимірювання та звітування, що робить її придатною для порівняльного оцінювання та використання інвесторами і регуляторами [47].

Сучасні систематичні огляди корпоративної сталості розглядають ESG саме як операціоналізацію ідей TBL, водночас відзначаючи невирішені проблеми: неузгодженість ESG-методологій, конфлікти інтересів стейкхолдерів та труднощі агрегування різномірних показників [47].

Корпоративна соціальна відповідальність (КСВ) тут виступає радше управлінською практикою, ніж системою оцінювання, а методологія розкриття показників Global Reporting Initiative (GRI) та Європейські стандарти звітності зі сталого розвитку (ESRS) - інструментами стандартизованого розкриття інформації [48].

З огляду на зазначене, для цілей цього дослідження ESG обрано як базову рамку, адже вона:

- охоплює управлінський вимір, критично важливий для промислових підприємств;
- орієнтована на вимірювані показники;
- узгоджена з міжнародними стандартами звітності.

Водночас застосування ESG до енергоємних МСПП потребує адаптації - насамперед у частині посилення економічної складової. Практичне застосування

ESG-підходу спирається на систему міжнародних стандартів: кількісна оцінка викидів парникових газів здійснюється відповідно до ISO 14064 [49], оцінювання екологічного впливу продукції - на основі методології аналізу життєвого циклу за ISO 14040 [50], системи енергетичного менеджменту регламентуються стандартом ISO 50001 [51], а вимоги до систем екологічного менеджменту - стандартом ISO 14001 [114].

Зовнішнім чинником, що безпосередньо формує вимоги до системи критеріїв оцінювання ефективності українських алюмінієвих МСПП, є Європейський зелений курс [52] та запроваджений у його межах механізм вуглецевого коригування на кордоні (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM). CBAM передбачає запровадження вуглецевого мита на імпорт до ЄС окремих видів вуглецеємної продукції, зокрема сталі, цементу, добрив, електроенергії, алюмінію та водню, і має на меті вирівняти вуглецеві витрати імпортерів та виробників ЄС, запобігаючи «перетіканню вуглецю».

Для української металургії, що формує близько 7 % валового внутрішнього продукту [115], CBAM є водночас викликом і стимулом. З одного боку, механізм висуває нові вимоги до зниження вуглецевого сліду продукції, що створює додаткові виклики для українських виробників через застарілі технології та високу енергоємність виробництва [46]. З іншого боку, CBAM перетворює вуглецеву інтенсивність продукції на безпосередній економічний параметр: показник питомих викидів CO₂-еквівалента на одиницю продукції та його динаміка стають фактичним критерієм допуску на ринок ЄС, а підтверджене зниження вуглецевого сліду - джерелом цінової конкурентної переваги. Дослідники наголошують, що адаптація галузі до CBAM потребує комплексу заходів: модернізації підприємств, залучення інвестицій, розвитку «зеленої» енергетики та оптимізації логістики [46].

Для МСПП алюмінієвого профілю це означає, що система критеріїв оцінювання економічної ефективності має включати не лише загальний рівень викидів, а й структурні показники - частку вторинного металу та питому вуглецеву інтенсивність за окремими стадіями виробництва, оскільки саме ці показники визначають конкурентоспроможність в умовах дії CBAM. Таким чином,

регуляторний контекст безпосередньо обґрунтовує включення емісійних та структурних критеріїв до системи оцінювання.

З урахуванням логіки ESG, результатів огляду наукового доробку та регуляторного контексту критерії оцінювання економічної ефективності МСПП доцільно структурувати у чотири узгоджені блоки. На відміну від класичного триблокового ESG-підходу, у запропонованій системі економічну складову виокремлено в самостійний блок, а не розчинено у складі управлінського виміру. Таке рішення зумовлене тим, що для енергоємних виробництв критичних матеріалів економічна результативність є не наслідком, а внутрішнім чинником сталого розвитку, без якого реалізація екологічних і соціальних цілей є неможливою. Відповідно система охоплює:

- економічні критерії (Econ) - прибутковість, собівартість, продуктивність, енерговитратність бізнес-моделі;
- екологічні критерії (E) - енергоємність, вуглецевий слід, обсяги та якість утилізації відходів, рівень циркулярності;
- соціальні критерії (S) - безпека праці, розвиток людського капіталу, кадрова стабільність, взаємодія із зацікавленими сторонами;
- управлінські критерії (G) - зрілість систем менеджменту, прозорість даних, наявність дорожніх карт декарбонізації, практики корпоративної соціальної відповідальності.

Розглянемо змістове наповнення та концептуальне підґрунтя кожного блоку.

Економічні критерії (Econ). Цей блок відображає традиційні результати господарської діяльності - рентабельність, собівартість, продуктивність праці та використання обладнання. Особливістю його застосування до алюмінієвих МСПП є виражена енергетична чутливість бізнес-моделі: частка енерговитрат у структурі собівартості плавлення є однією з найвищих серед промислових галузей, а орієнтовні витрати електроенергії на плавлення алюмінію та кольорових сплавів становлять близько 600-800 кВт·год на тонну [53]. Тому до економічного блоку доцільно включати не лише узагальнені фінансові показники, а й структурні: частку енерговитрат у собівартості та енерговартість одиниці продукції, які

безпосередньо пов'язують економічну ефективність з енергетичними та екологічними параметрами виробництва.

Екологічні критерії (E). Плавлення алюмінію є високоенергоємним процесом, що зумовлює визначальну роль енергетичної та емісійної складових. Ключовими для цього блоку є енергоємність плавлення, питома вуглецева інтенсивність продукції за категоріями Scope 1 і Scope 2, частка відновлюваних джерел енергії у споживанні, а також показники поводження з відходами. Особливістю алюмінієвого виробництва є те, що структура шихти (співвідношення первинного та вторинного металу) одночасно визначає і економічну ефективність, і екологічну результативність: вторинне виробництво алюмінію потребує лише близько 5 % енергії, необхідної для виробництва первинного металу [44]. Питома вуглецева інтенсивність продукції може бути формалізована як функція часток первинного та вторинного металу й енергоємності процесів, що створює основу для розроблення кількісних еколого-економічних критеріїв; відповідні розрахункові залежності наведено в Додатку А.

Окрему групу екологічних критеріїв формують індикатори замкненості матеріальних потоків. Сольовий шлак та оксидні нашарування є специфічними відходами ливарного переділу, причому їх вихід на одиницю виплавленого металу в кольоровій металургії є значно вищим, ніж у чорній [54]. До системи критеріїв доцільно включати рівень технологічних втрат, частку внутрішнього рециклінгу та ступінь утилізації шлаків. Концептуальним підґрунтям цього блоку є концепція циркулярної економіки, яка стосовно алюмінієвого сектору набула розвитку у вигляді спеціалізованих індикаторів циркулярності та сучасних технологій підготовки і переплавлення брухту [55, 56]. Дослідження засвідчують, що алюміній належить до матеріалів з найвищим потенціалом рециклінгу - він може перероблятися практично необмежену кількість разів без втрати якості, а застосування індикаторів циркулярності дає змогу кількісно оцінити перехід виробництва від лінійної до замкненої моделі [57, 186]. Сукупний ефект циркулярних практик може бути формалізований у вигляді інтегрального індексу утилізаційної ефективності.

Соціальні критерії (S). Алюмінієве виробництво характеризується підвищеним рівнем професійних ризиків, обумовлених високотемпературними процесами плавлення, роботою з розплавленим металом та застосуванням хімічно активних флюсів; дослідження психосоціальних і фізичних ризиків у металургійному та гірничодобувному секторах підтверджують їх суттєвий вплив на безпеку та добробут працівників [58]. Це зумовлює пріоритет показників безпеки праці - частоти нещасних випадків із втратою працездатності (LTIFR) та загальної частоти реєстрованих інцидентів (TRIR). Концептуально такий підхід спирається на класичну модель «трикутника безпеки» Г. В. Генріха (H. W. Heinrich), згідно з якою серйозним аваріям передують велика кількість дрібних інцидентів та небезпечних умов, що обґрунтовує необхідність системного моніторингу травматизму [59].

Другу групу соціальних критеріїв формують показники розвитку та утримання персоналу - обсяг навчання на одного працівника та рівень плинності кадрів. Теоретичним підґрунтям тут є висновки Хоторнських досліджень про вирішальну роль соціально-психологічних факторів та якості організаційного середовища для продуктивності й добробуту персоналу [60]. Третю групу формують показники етичного управління та взаємодії з громадами, зокрема гендерний баланс у керівництві та результативність механізму розгляду скарг.

Водночас для МСПП соціальний блок об'єктивно має обмежену вагу та нижчу емпіричну наповненість порівняно з економічним і екологічним вимірами. Це зумовлено специфікою малих і середніх підприємств: невелика чисельність персоналу робить показники травматизму та плинності кадрів волатильними й чутливими до поодиноких подій, а обмеженість публічної нефінансової звітності МСПП ускладнює зіставне вимірювання соціальних індикаторів. Тому соціальний блок свідомо представлено компактним набором базових, верифікованих за первинним обліком показників (безпека праці, навчання персоналу, плинність кадрів).

Управлінські критерії (G). Управлінські критерії розглядаються як базис, що забезпечує інституційні та організаційні умови для реалізації економічних,

екологічних і соціальних цілей сталого розвитку. Вони відображають, наскільки система корпоративного управління, планування та звітності забезпечує інтеграцію принципів сталого розвитку в бізнес-модель підприємства. До цього блоку належать зрілість систем енергетичного та екологічного менеджменту, наявність і повнота дорожньої карти декарбонізації, частка «зеленого» капіталу в інвестиціях, рівень верифікації даних та прозорість нефінансової звітності, що формується відповідно до стандартів GRI та ESRS [48].

Сутнісним змістом наведеної системи критеріїв є підвищення результативності використання ресурсів. Одним із найбільш відпрацьованих підходів до підвищення ресурсоефективності у промисловості є концепція ощадливого виробництва (Lean), класичною реалізацією якої є виробнича система Toyota [61]. Вона ґрунтується на принципах «точно вчасно» (Just-in-Time) та «дзідока» (автоматизація з людським контролем), доповнених концепцією постійного вдосконалення (kaizen) [62]. Для алюмінієвих МСПП застосування принципів ощадливого виробництва дає змогу зменшити частку браку та технологічних втрат, знизити енергоємність плавки й підготовчих операцій та скоротити утворення шлаків.

Запропонована системи критеріїв спирається на низку принципів, що забезпечують її наукову обґрунтованість та практичну застосовність на МСПП:

- *принцип комплексності* - система охоплює всі чотири виміри сталого розвитку (економічний, екологічний, соціальний, управлінський), не зводячи оцінювання до окремої групи показників;
- *принцип вимірюваності* - кожен критерій операціоналізується через конкретні показники з визначеними одиницями вимірювання та джерелами даних, що унеможливорює суто якісні, неперевірювані оцінки;
- *принцип галузевої адаптованості* - склад показників враховує технологічну специфіку алюмінієвого виробництва (енергоємність плавлення, структура шихти, специфічні відходи);

- *принцип ієрархічності* - окремі показники можуть агрегуватися в блокові індекси, а блокові - в інтегральну оцінку, що дає змогу аналізувати ефективність як деталізовано, так і узагальнено;
- *принцип зіставності в часі* - показники формулюються так, щоб забезпечити коректне порівняння результатів **діяльності** підприємства за різні періоди та оцінювання динаміки;
- *принцип реалістичності для МСПП* - обсяг показників та складність їх розрахунку співмірні з обліковими можливостями малих і середніх підприємств.

Дотримання цих принципів забезпечує, що сформована система критеріїв є не лише теоретичною конструкцією, а й практичним інструментом, придатним для впровадження в управлінську діяльність МСПП (рис.1.5).



Рис. 1.5. Чотириблокова система критеріїв оцінювання економічної ефективності МСПП на засадах сталого розвитку

Джерело: побудовано автором.

Сформована чотириблокова система критеріїв оцінювання економічної ефективності МСПП на засадах сталого розвитку узагальнена в табл. 1.7. Деталізований склад ключових показників ефективності (KPI) у межах кожного блоку, одиниці їх вимірювання, цільові орієнтири та формули розрахунку наведено в Додатку А.

Таблиця 1.7

Система критеріїв оцінювання економічної ефективності МСПП на засадах
сталого розвитку

Блок критеріїв	Склад критеріїв	Що відображає
Економічні (Econ)	Рентабельність, собівартість, продуктивність праці, частка енерговитрат у собівартості, енерговартість продукції	Господарську результативність та енергетичну чутливість бізнес-моделі підприємства
Екологічні (E)	Енергоємність плавлення, вуглецева інтенсивність (Score 1+2), частка ВДЕ, частка вторинного металу, рівень циркулярності та утилізації відходів	Екологічну результативність і ступінь замкненості матеріальних та енергетичних потоків
Соціальні (S)	Частота травматизму (LTIFR, TRIR), навчання персоналу, плинність кадрів, взаємодія з громадами	Безпеку праці, розвиток людського капіталу та соціальну відповідальність
Управлінські (G)	Зрілість систем менеджменту (ISO), дорожня карта декарбонізації, частка «зеленого» CAPEX, верифікація та прозорість звітності	Інституційну спроможність до інтеграції принципів сталого розвитку в управління

Джерело: розроблено автором.

Запропонована система критеріїв забезпечує комплексність охоплення всіх вимірів сталого розвитку, вимірюваність через конкретні показники, інтеграцію управлінських рішень з операційними результатами та узгодженість з вимогами міжнародних стандартів і регуляторного середовища ЄС. Економічна ефективність у цій системі розглядається не ізольовано, а як результат збалансованого поєднання фінансових, екологічних та соціальних цілей за умови належної якості управління.

Щоб система критеріїв була не переліком розрізнених показників, а цілісною моделлю оцінювання, вона передбачає визначений спосіб переходу від окремих КРІ до узагальнених оцінок. Концептуально цей перехід має ієрархічну будову з трьох рівнів: від первинних показників до блокових індексів за чотирма вимірами (Econ, E, S, G) й до інтегральної оцінки економічної ефективності МСПП на засадах сталого розвитку. Така побудова відповідає принципу ієрархічності й дозволяє аналізувати діяльність підприємства як деталізовано, на рівні окремих критеріїв, так і узагальнено, на рівні зведеного індексу (рис.1.6).

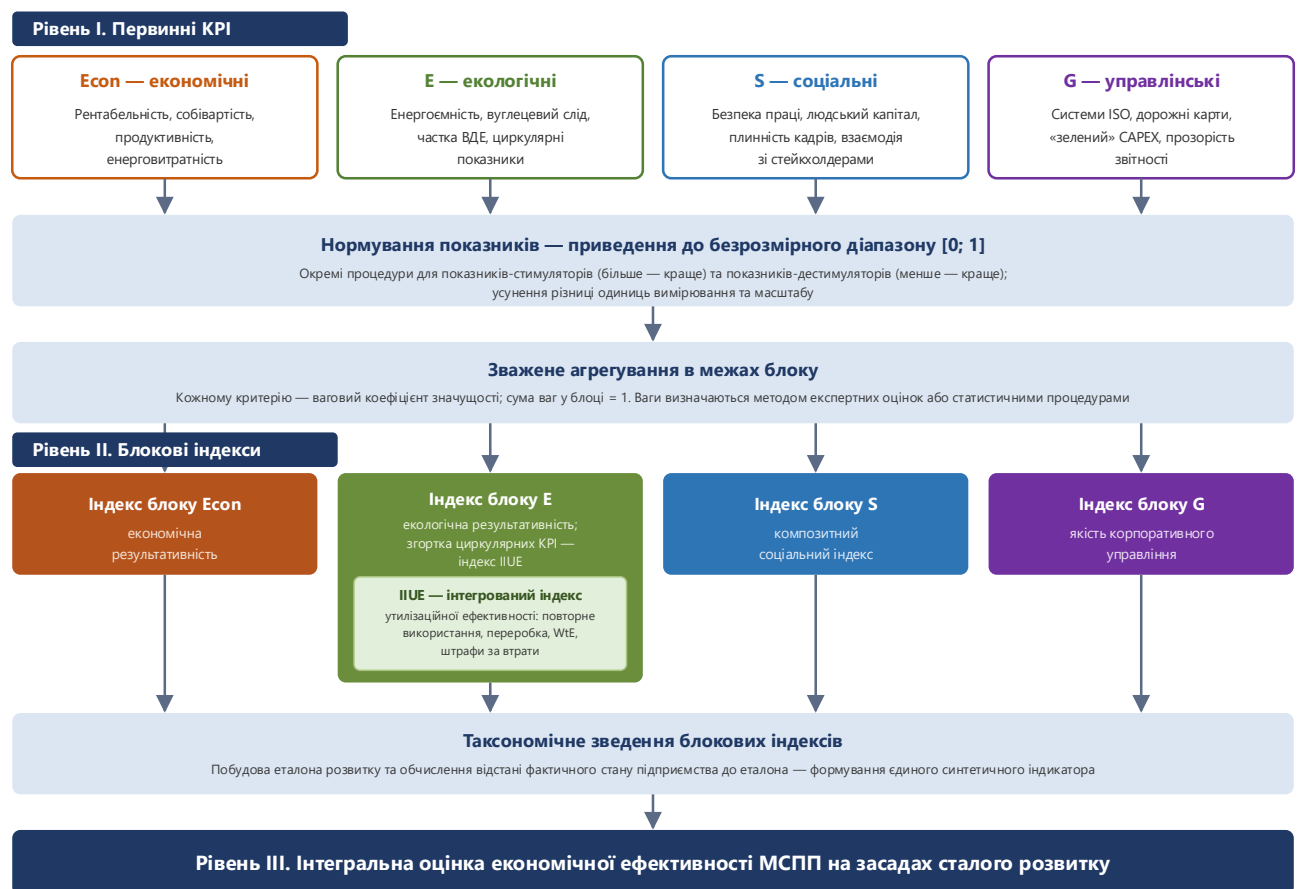


Рис. 1.6. Багаторівнева модель агрегування показників системи критеріїв оцінювання економічної ефективності МСПП на засадах сталого розвитку

Джерело: побудовано автором.

Передумовою агрегування є приведення показників до зіставного вигляду. Критерії системи виміряні в різних одиницях (кВт·год/т, грн/т, %, тCO₂e/т, випадки/млн год) і мають різну спрямованість бажаної зміни, тому їх безпосереднє додавання некоректне. Для показників-стимуляторів, зростання яких відповідає

підвищенню ефективності (частка вторинної сировини, ОЕЕ, частка ВДЕ), та показників-дестимуляторів, зниження яких є бажаним (енергоємність, питома вуглецева інтенсивність, рівень травматизму, плинність кадрів), застосовуються окремі процедури нормування, що приводять усі значення до безрозмірного діапазону. Така нормалізація унеможливорює домінування показників із більшим масштабом вимірювання та забезпечує однорідність даних.

Зведення нормованих показників у блоковий індекс здійснюється через зважене агрегування: кожному критерію присвоюється ваговий коефіцієнт, що відображає його відносну значущість у межах блоку, причому сума ваг у межах блоку дорівнює одиниці. Вагові коефіцієнти доцільно встановлювати методом експертних оцінок із залученням фахівців галузі або, за наявності достатнього масиву спостережень, на основі статистичних процедур. Той самий підхід - нормування часткових показників та їх зважена сума - застосовується для формування композитного індексу соціальної складової, що забезпечує методологічну єдність агрегування за всіма чотирма блоками.

Окремим елементом екологічного блоку є інтегральний індекс утилізаційної ефективності (ІІУЕ), який узагальнює внесок повторного використання, переробки та енергетичного відновлення матеріальних потоків з урахуванням штрафів за безповоротні втрати і зводить групу циркулярних показників у єдиний індикатор замкненості матеріальних потоків.

Зведення чотирьох блокових індексів у загальну інтегральну оцінку потребує методу, здатного коректно поєднати різноспрямовані виміри сталого розвитку. Таким інструментом є таксономічний аналіз, в основі якого лежить побудова еталона розвитку та обчислення відстані фактичного стану підприємства до цього еталона. Перевага таксономічного підходу полягає в отриманні єдиного синтетичного індикатора, придатного для порівняння підприємств між собою та для оцінювання динаміки окремого підприємства в часі.

Таким чином, запропонована система критеріїв є багаторівневою моделлю оцінювання, у якій нормування забезпечує зіставність вихідних даних, зважене агрегування - формування блокових індексів; спеціалізований індекс ІІУЕ - суму

циркулярних показників; таксономічний підхід - обчислення інтегральної оцінки економічної ефективності МСПП на засадах сталого розвитку. При цьому таксономічний показник характеризує досягнутий рівень (стан) та динаміку сталого розвитку і призначений для порівняння й оцінювання в часі, тоді як вибір і ранжування альтернативних управлінських рішень здійснюються за інтегральним індексом IESG-E.

1.3. Декарбонізація у забезпеченні економічної ефективності МСПП: проблеми та пріоритети

Сформована система критеріїв оцінювання економічної ефективності МСПП на засадах сталого розвитку відводить екологічному та, зокрема, емісійному виміру одне з центральних місць. Це закономірно: для енергоємних виробництв критичних матеріалів зниження вуглецевого сліду перетворилося з елемента екологічної відповідальності на чинник економічної конкурентоспроможності. Узагальнюючим поняттям, що описує цей процес, є декарбонізація.

Під декарбонізацією у широкому значенні розуміють процес послідовного зменшення інтенсивності викидів діоксиду вуглецю та інших парникових газів у господарській діяльності з кінцевою метою досягнення вуглецевої нейтральності - стану, за якого обсяг антропогенних викидів врівноважується їх поглинанням. На рівні промислового підприємства декарбонізація означає системне скорочення питомих викидів парникових газів на одиницю продукції за рахунок підвищення енергоефективності, переходу на відновлювані джерела енергії, технологічної модернізації та розвитку циркулярних практик [64, 65].

Слід розрізняти споріднені, проте не тотожні поняття. Вуглецева нейтральність (carbon neutrality) означає баланс між викидами та поглинанням діоксиду вуглецю; нульові викиди (net zero) - ширше поняття, що охоплює баланс за всіма парниковими газами; кліматична нейтральність додатково враховує інші впливи на кліматичну систему. Для промислового підприємства практичним орієнтиром є насамперед скорочення питомих викидів продукції, оскільки повне досягнення нейтральності на рівні окремого МСПП у короткостроковій

перспективі є технологічно недосяжним і передбачає компенсаційні механізми. Тому в цьому дослідженні під декарбонізацією МСПП розуміється передусім траєкторія послідовного зниження вуглецевої інтенсивності продукції, а не одномоментне досягнення нульового балансу.

В межах нашого дослідження декарбонізація розглядається не як зовнішнє обмеження, нав'язане підприємству регуляторними вимогами, а як напрям підвищення економічної ефективності. Цей погляд має подвійне обґрунтування. По-перше, значна частина заходів декарбонізації - підвищення енергоефективності, скорочення втрат, збільшення частки вторинної сировини - одночасно знижує собівартість продукції, тобто має від'ємну вартість скорочення викидів. По-друге, в умовах запровадження вуглецевого ціноутворення та механізмів прикордонного коригування вуглецевий слід продукції безпосередньо впливає на її кінцеву ціну та доступ до ринків. Таким чином, декарбонізація та економічна ефективність для сучасного промислового МСПП є взаємодоповнюючими цілями.

Водночас декарбонізація енергоємних виробництв пов'язана з низкою проблем (технологічних, інвестиційних та інституційних), які особливо гостро постають для МСПП з обмеженими ресурсами. Тому важливим є визначення ключових проблем і пріоритетів декарбонізації алюмінієвих МСПП у їх взаємозв'язку із завданням підвищення економічної ефективності.

Імператив декарбонізації промисловості формується глобальним кліматичним порядком денним. Його правовою основою є Паризька угода 2015 року, яка визначила мету утримання зростання глобальної середньої температури суттєво нижче 2°C порівняно з доіндустріальним рівнем з прагненням обмежити це зростання до 1,5°C [63]. Спеціальна доповідь Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (ІРСС) щодо глобального потепління на 1,5 °C встановила, що досягнення цієї мети потребує глобального балансу між викидами та поглинанням діоксиду вуглецю приблизно до 2050 року [63, 64].

За оцінками Організації Об'єднаних Націй, для утримання потепління в межах 1,5 °C світові викиди парникових газів мають бути скорочені приблизно на 45 % до 2030 року порівняно з рівнем 2010 року та досягти нетто-нульового

значення близько 2050 року [64]. Реалізація цієї мети спирається на механізм національно визначених внесків (Nationally Determined Contributions, NDC), у межах якого держави-учасниці Паризької угоди періодично переглядають та посилюють власні зобов'язання за принципом поступового підвищення амбіцій.

Орієнтиром для трансформації енергетичного та промислового секторів виступає сценарій досягнення нетто-нульових викидів до 2050 року, розроблений Міжнародним енергетичним агентством (IEA). Згідно з ним ключовими напрямками декарбонізації є підвищення енергоефективності, електрифікація кінцевого споживання та масштабне нарощування потужностей відновлюваної енергетики, тоді як споживання викопного палива має різко скоротитися [65]. Дослідження засвідчують, що навіть за умови виконання наявних національних зобов'язань електроенергетичний сектор у середньому декарбонізується раніше, тоді як промисловий сектор, до якого належить металургія, відстає на кілька десятиліть, що робить його декарбонізацію одним із найскладніших завдань низьковуглецевого переходу [66].

Промислові виробництва, для яких скорочення викидів є технологічно складним і капіталомістким, у міжнародній практиці позначають як «важкі для декарбонізації» (hard-to-abate) сектори. Алюмінієве виробництво належить саме до цієї категорії, що визначає підвищену увагу до нього з боку як кліматичної політики, так і дослідників.

Складність декарбонізації важких для скорочення викидів галузей зумовлена кількома взаємопов'язаними чинниками. По-перше, це висока енергоємність технологічних процесів, які потребують або значних обсягів електроенергії, або високотемпературної теплоти, що ускладнює їх електрифікацію. По-друге, це тривалі інвестиційні цикли: промислове обладнання експлуатується десятиліттями, тому його заміна на низьковуглецеві аналоги вимагає значних капіталовкладень і не може бути здійснена швидко. По-третє, це обмежена доступність зрілих альтернативних технологій для окремих процесів. Саме тому міжнародні аналітичні дослідження засвідчують, що промисловий сектор у середньому декарбонізується значно повільніше, ніж електроенергетика [66], а для

прискорення цього процесу формуються спеціальні інструменти - зокрема галузеві коаліції, що об'єднують компанії-першопрохідці та стимулюють попит на низьковуглецеву продукцію важких для декарбонізації секторів.

Для алюмінієвої галузі ця проблематика має особливе значення з огляду на подвійну роль металу в низьковуглецевому переході. З одного боку, алюміній є енергоємним та емісійно інтенсивним матеріалом; з іншого - він належить до критичних матеріалів енергетичного переходу [111], оскільки широко застосовується у виробництві сонячних панелей, вітрових установок, електромобілів та електромереж. Прогнозоване зростання попиту на алюміній у міру розгортання енергетичного переходу означає, що декарбонізація галузі має відбуватися паралельно з нарощуванням обсягів виробництва, що додатково ускладнює завдання та підвищує значущість ресурсоефективних напрямів, насамперед циркулярності.

Глобальні кліматичні цілі операціоналізуються через регіональні та національні регуляторні рамки, які безпосередньо формують вимоги до промислових підприємств. Для українських МСПП, орієнтованих на європейський ринок, визначальне значення має кліматична політика Європейського Союзу. Основою цієї політики є Європейський зелений курс (European Green Deal) - стратегія, спрямована на досягнення кліматичної нейтральності ЄС до 2050 року. Довгострокова стратегія ЄС, подана до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, передбачає, що держави-члени розробляють національні довгострокові стратегії та інтегровані національні плани з енергетики і клімату, узгоджені із загальноєвропейською метою кліматичної нейтральності [67]. Це означає системне посилення вимог до вуглецевої ефективності продукції на всьому єдиному ринку.

Безпосереднім інструментом, що впливає на конкурентоспроможність українських виробників, є механізм вуглецевого коригування на кордоні (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM). Він передбачає запровадження вуглецевого мита на імпорт до ЄС вуглецеємної продукції, зокрема алюмінію, з метою вирівнювання вуглецевих витрат імпортерів та виробників ЄС і запобігання «перетіканню вуглецю». Для виробника це означає, що питома вуглецева

інтенсивність продукції перетворюється на безпосередній економічний параметр, який впливає на кінцеву ціну та доступ до ринку.

Поряд з регуляторними механізмами формується система добровільних рамок, що задають методологію постановки цілей декарбонізації. Найбільш поширеною є ініціатива науково обґрунтованих цілей (Science Based Targets initiative, SBTi), яка встановлює методологію визначення підприємствами цілей скорочення викидів, узгоджених з траєкторією утримання потепління в межах 1,5 °C. Окремим інструментом є таксономія сталого фінансування ЄС, що класифікує види економічної діяльності за критерієм їх внеску в досягнення екологічних цілей і впливає на доступ підприємств до «зеленого» фінансування.

Механізм СВAM запроваджується поетапно: за перехідний період імпортери зобов'язані звітувати про вуглецевий слід продукції без сплати мита, а в подальшому - придбавати сертифікати, ціна яких прив'язана до котирувань Системи торгівлі викидами ЄС. Для виробника це означає, що вже на етапі звітування виникає потреба у достовірному вимірюванні питомих викидів продукції, а отже - у запровадженні відповідних систем обліку та верифікації. Таким чином, СВAM не лише створює ціновий стимул до декарбонізації, а й формує вимогу до якості даних про вуглецевий слід, що безпосередньо пов'язує його з управлінським блоком системи критеріїв.

Таким чином, регуляторне середовище формує для алюмінієвих МСПП цілісну систему стимулів: декарбонізація стає одночасно умовою доступу до ринків ЄС, чинником вартості капіталу та критерієм конкурентоспроможності. Це обґрунтовує розгляд декарбонізації саме в економічному, а не лише екологічному вимірі.

Розроблення пріоритетів декарбонізації потребує попереднього аналізу структури вуглецевого сліду алюмінієвого виробництва. Алюмінієва галузь належить до найбільш емісійно інтенсивних секторів світової промисловості: за оцінками, вона відповідає за понад 1,1 млрд. т. CO₂-еквівалента викидів щорічно [68].

Визначальною характеристикою галузі є надзвичайно висока енергоємність первинного виробництва. Виробництво алюмінію передбачає електролітичне розкладання глинозему, що потребує значних обсягів електроенергії для розриву міцних хімічних зв'язків. Аналіз життєвого циклу засвідчує, що первинна виплавка та виробництво глинозему формують переважну частину галузевих викидів, причому споживання електроенергії є домінуючим джерелом емісій за категоріями розподілу [69]. Саме тому вуглецевий слід первинного алюмінію критично залежить від структури енергетичного балансу: метал, вироблений на основі вугільної генерації, має у кілька разів вищу вуглецеву інтенсивність, ніж вироблений на основі гідро- або іншої низьковуглецевої електроенергії.

Для системного аналізу викиди підприємства поділяють на три категорії відповідно до методології GHG Protocol. Прямі викиди (Scope 1) виникають безпосередньо на виробничому майданчику від спалювання палива у плавильних печах та технологічних процесів. Непрямі енергетичні викиди (Scope 2) пов'язані зі спожитою електроенергією та теплом. Непрямі викиди ланцюга створення вартості (Scope 3) охоплюють емісії, пов'язані з видобутком сировини, транспортуванням та подальшим використанням продукції. Дослідники наголошують, що декарбонізація алюмінієвого виробництва має здійснюватися паралельно за всіма трьома категоріями: скорочення Scope 1 досягається заміщенням викопного палива на виробничому майданчику, Scope 2 підвищенням енергоефективності та інтеграцією відновлюваної енергії, Scope 3 управлінням ланцюгом постачання та матеріальною циркулярністю [68]. Зміст категорій викидів та відповідні напрями скорочення стосовно алюмінієвого МСПП узагальнено в табл. 1.8. Зміст категорій викидів та відповідні напрями їх скорочення стосовно алюмінієвого МСПП узагальнено на рис. 1.7.



Рис. 1.7. Категорії викидів парникових газів алюмінієвого МСПП та напрями їх скорочення

Джерело: побудовано автором.

Таблиця 1.8

Категорії викидів парникових газів алюмінієвого МСПП та напрями їх скорочення

Категорія	Джерела викидів	Напрями скорочення
Score 1 (прямі)	Спалювання палива у плавильних печах, технологічні процеси на майданчику	Заміщення викопного палива, електрифікація теплових процесів, підвищення ККД печей
Score 2 (непрямі енергетичні)	Спожита електроенергія та теплова енергія	Інтеграція відновлюваної енергії, договори постачання «зеленої» енергії, енергоефективність
Score 3 (ланцюг вартості)	Видобуток і постачання сировини, транспортування, використання продукції	Збільшення частки вторинного металу, управління ланцюгом постачання, циркулярність

Джерело: систематизовано автором на основі GHG Protocol та [68].

Принципово важливою для МСПП є відмінність між первинним та вторинним виробництвом. Вторинне виробництво алюмінію (переплавлення брухту) потребує лише близько 5 % енергії, необхідної для виробництва

первинного металу. За оцінками досліджень життєвого циклу, заміщення первинного алюмінію вторинним забезпечує скорочення вуглецевих викидів приблизно на 96 % за одночасного зниження витрат до 80 % [44]. Це означає, що для алюмінієвих МСПП, які переважно працюють у сегменті вторинної переробки та лиття, циркулярність є не лише екологічним, а й потужним економічним важелем декарбонізації.

Водночас декарбонізація вторинного виробництва має власний технологічний бар'єр, адже потребує високотемпературного плавлення брухту, забезпечення якого низьковуглецевими джерелами теплоти залишається складним завданням [68]. Це визначає специфіку пріоритетів декарбонізації саме для МСПП, відмінну від пріоритетів великих виробників первинного металу.

Поряд з діоксидом вуглецю алюмінієве виробництво пов'язане з викидами інших речовин, що мають кліматичне та екологічне значення. До них належать перфторвуглеці, які утворюються в окремих режимах електролізу і характеризуються надзвичайно високим потенціалом глобального потепління, а також пил, оксиди азоту й сірки та фториди, що утворюються під час плавлення. Хоча основна увага декарбонізації зосереджена на діоксиді вуглецю, повнота оцінювання вуглецевого сліду потребує врахування всіх парникових газів у CO₂-еквіваленті. Для вторинного виробництва, на якому переважно зосереджені МСПП, частка процесних викидів неуглекислотної природи є нижчою, ніж для первинного, що є додатковим аргументом на користь циркулярних напрямів декарбонізації.

Проблематика декарбонізації важких для скорочення викидів галузей сформувала самостійний напрям сучасних досліджень. Аналіз доробку дає змогу виокремити кілька дослідницьких підходів.

Перший підхід представлений комплексними оглядами шляхів декарбонізації алюмінієвої галузі [112, 146]. Систематичний огляд шляхів декарбонізації та інтеграції процесів засвідчує, що головним викликом є енергоємність первинного виробництва, а основним бар'єром декарбонізації вторинного виробництва - потреба у високотемпературному плавленні; автори наголошують на потребі узгодженого, багаторівневого підходу замість

фрагментарних, ситуативних рішень [68]. Це є важливим аргументом на користь системного розгляду декарбонізації у взаємозв'язку з економічною ефективністю.

Другий підхід ґрунтується на застосуванні методології аналізу життєвого циклу (LCA) як інструменту підтримки рішень щодо декарбонізації. Дослідження, що інтегрують LCA з оцінюванням повного ланцюга створення вартості алюмінію, виокремлюють три узагальнені напрями скорочення викидів (упровадження передових технологій, оптимізацію структури енергоспоживання та рециклінг брухту) та підкреслюють подвійний, екологічний та економічний, ефект заміщення первинного металу вторинним [44]. Поєднання LCA з оцінюванням витрат життєвого циклу (Life Cycle Costing) розглядається як перспективний напрям, що дає змогу обґрунтовувати декарбонізаційні рішення одночасно за екологічним та економічним критеріями.

Третій підхід акцентує синергію технологій, рециклінгу та відновлюваної енергетики. У галузевих аналітичних оглядах наголошується, що жоден окремий напрям не забезпечує необхідного масштабу скорочення викидів, а результат досягається поєднанням декарбонізації електропостачання, скорочення прямих викидів та підвищення ресурсоефективності [70]. Цей висновок узгоджується з трискладовою моделлю напрямів декарбонізації, запропонованою галузевими інституціями.

Четвертий підхід стосується галузевих дорожніх карт. Зокрема, для європейської алюмінієвої промисловості розроблено науково обґрунтовані сценарії досягнення нетто-нульових викидів до 2050 року, що передбачають значне скорочення емісій за рахунок електрифікації ключових процесів - рафінування глинозему та виплавки - за умови суттєвих інвестицій у модернізацію [71, 147]. Деталізований розгляд галузевих дорожніх карт та цільових показників за роками виходить за межі теоретико-методологічного аналізу цього підрозділу і належить до прикладної частини дослідження, тому тут вони згадуються лише як контекст.

Узагальнення доробку засвідчує спільний висновок: декарбонізація енергоємних виробництв є технологічно можливою, проте потребує системного підходу, значних інвестицій та узгодження екологічних й економічних критеріїв.

Водночас переважна більшість досліджень орієнтована на великі підприємства первинного виробництва, тоді як специфіка декарбонізації малих і середніх підприємств вторинної переробки залишається недостатньо опрацьованою - що визначає дослідницьку нішу цього підрозділу.

П'ятий підхід представлений вітчизняними дослідженнями декарбонізації української промисловості. У них наголошується, що декарбонізація для України є водночас викликом і драйвером зростання: міжнародна торгівля дедалі більше враховує показники екологічності та вуглецеємності продукції, тому екологічна модернізація стає умовою збереження експортних позицій. Аналітичні праці вітчизняних дослідницьких центрів акцентують потребу в адаптації кліматичної політики до безпекових викликів та в інтеграції енергоефективності у програми повоєнного відновлення промисловості [72]. Українські дослідження доповнюють міжнародний доробок врахуванням специфічного контексту, проте здебільшого мають загальногалузевий характер і не деталізують пріоритетів для окремих сегментів, зокрема для малих і середніх підприємств.

На основі аналізу наукового доробку технологічні напрями декарбонізації алюмінієвих МСПП можна систематизувати у кілька груп, узагальнених у табл. 1.9.

Таблиця 1.9

Технологічні напрями декарбонізації алюмінієвих МСПП

Напря́м	Змі́ст	Застосовні́сть для МСПП
Енергоефективність	Зниження питомих енерговитрат плавлення, утилізація відходів теплоти, оптимізація режимів печей	Висока - низький поріг входу, від'ємна вартість скорочення викидів
Інтеграція ВДЕ та електрифікація	Перехід на відновлювану електроенергію, договори постачання «зеленої» енергії, електрифікація теплових процесів	Середня - залежить від доступу до ВДЕ та стану електромережі
Циркулярність і рециклінг	Збільшення частки вторинного металу в шихті, внутрішній рециклінг, утилізація шлаків	Висока - основний важіль для МСПП вторинного сегмента
Передові технології	Інертні аноди, уловлювання та зберігання вуглецю (CCUS)	Низька - висока капіталомісткість, орієнтація на великих виробників

Джерело: систематизовано автором на основі джерел [44, 68, 70, 71].

Енергоефективність є першочерговим напрямом декарбонізації для МСПП. Підвищення коефіцієнта корисної дії плавильних печей, утилізація відходів теплоти та оптимізація технологічних режимів дають змогу скоротити як викиди, так і витрати, тобто мають від’ємну вартість скорочення викидів. Низький поріг входу та швидка окупність роблять цей напрям пріоритетним саме для підприємств з обмеженими інвестиційними ресурсами.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії та електрифікація безпосередньо скорочують викиди Scope 2. Оскільки для алюмінієвого виробництва саме споживання електроенергії є домінуючим джерелом викидів [69], перехід на відновлювану електроенергію - через власну генерацію або договори постачання «зеленої» енергії - є потужним важелем декарбонізації. Електрифікація теплових процесів плавлення розглядається міжнародними галузевими дослідженнями як ключовий напрям [71], однак для МСПП її застосовність обмежується станом електромережі та потребою у стабільному постачанні значних потужностей.

Циркулярність і рециклінг є для алюмінієвих МСПП центральним напрямом декарбонізації. Збільшення частки вторинного металу в шихті безпосередньо знижує вуглецеву інтенсивність продукції, а внутрішній рециклінг технологічних втрат та утилізація шлаків зменшують безповоротні втрати металу. Унікальною властивістю алюмінію є практично необмежена здатність до повторної переробки без втрати якості, що робить циркулярні практики стійким довгостроковим важелем зниження викидів.

Окремим резервом декарбонізації, тісно пов’язаним з циркулярністю, є промисловий симбіоз - використання відходів та надлишкової енергії одного виробництва як ресурсу для іншого. Для алюмінієвих МСПП це насамперед утилізація відходів теплоти плавильних печей, яку можна спрямовувати на попередній підігрів шихти, опалення або потреби суміжних виробництв. Утилізація надлишкової теплоти не потребує зміни основної технології та належить до заходів з порівняно низькою вартістю, проте її масштаб обмежений конфігурацією конкретного підприємства та наявністю споживачів теплоти поблизу. Розвиток

циркулярних практик доцільно доповнювати індикаторами замкненості матеріальних та енергетичних потоків, що дають змогу кількісно відстежувати прогрес декарбонізації в межах екологічного блоку критеріїв.

Передові технології - інертні аноди, що замінюють традиційні вуглецеві аноди й унеможливають прямі викиди CO_2 у процесі електролізу, а також технології уловлювання та зберігання вуглецю - мають значний потенціал скорочення емісій, проте характеризуються високою капіталомісткістю та орієнтовані передусім на великих виробників первинного металу [70]. Для МСПП ці технології у короткостроковій перспективі залишаються малодоступними, тому в системі пріоритетів вони посідають місце довгострокового орієнтиру, а не першочергового заходу.

Множинність технологічних напрямів декарбонізації зумовлює потребу в інструментах їх економічної пріоритизації. Підприємство з обмеженими ресурсами не може реалізувати всі заходи одночасно і потребує методу впорядкування їх за критерієм економічної доцільності.

Найбільш поширеним інструментом такої пріоритизації є крива граничних витрат на скорочення викидів (Marginal Abatement Cost Curve, МАСС). Вона впорядковує доступні заходи декарбонізації за показником вартості скорочення однієї тонни CO_2 -еквівалента, вираженим у грошових одиницях на тонну, і дає змогу виявити заходи з від'ємною вартістю - такі, що скорочують викиди й одночасно знижують витрати, - та заходи з додатною вартістю, що потребують інвестицій [73]. Логіка МАСС безпосередньо узгоджується з трактуванням декарбонізації як прямої підвищення економічної ефективності: підприємству доцільно насамперед реалізовувати заходи з від'ємною та низькою вартістю скорочення викидів, переходячи до капіталомістких рішень у міру зростання вуглецевого ціноутворення.

Водночас застосування МАСС потребує врахування її методологічних обмежень. Дослідники зазначають, що результати побудови кривої є чутливими до припущень - ставки дисконтування, оцінок інвестиційних витрат та строку служби обладнання, - а також що статична МАСС не відображає динамічних змін вартості

та ефективності технологій [73]. З огляду на це МАСС доцільно розглядати як інструмент попередньої пріоритизації, а не як остаточну підставу для рішень; її результати потребують уточнення з урахуванням специфіки конкретного підприємства.

Логіку застосування кривої граничних витрат можна проілюструвати на узагальненому прикладі. Якщо для алюмінієвого МСПП розглядати набір заходів декарбонізації, то заходи з підвищення енергоефективності - оптимізація режимів печей, утеплення, утилізація відходів теплоти - як правило, мають від'ємну граничну вартість скорочення викидів, оскільки економія енергоресурсів перевищує витрати на впровадження. Збільшення частки вторинного металу в шихті також зазвичай має від'ємну або близьку до нуля вартість, поєднуючи скорочення викидів зі зниженням сировинних витрат. Натомість перехід на відновлювану електроенергію має, як правило, помірну додатну вартість, а капіталомістка технологічна модернізація - високу додатну вартість скорочення викидів. Відповідно раціональна послідовність декарбонізації полягає у першочерговій реалізації заходів з від'ємною вартістю, які покращують економічний результат уже на момент впровадження, з поступовим переходом до капіталомістких рішень у міру зростання вуглецевого ціноутворення, що підвищує економічну доцільність останніх.

Реалізація декарбонізаційних заходів стикається з низкою інвестиційних та інституційних бар'єрів, які для МСПП є особливо відчутними:

- обмежений доступ до капіталу - заходи з додатною вартістю скорочення викидів потребують інвестицій, які малі підприємства не завжди можуть залучити на прийнятних умовах;
- високий період окупності капіталомістких технологій за невизначеності майбутнього вуглецевого ціноутворення;
- обмеженість кадрових та організаційних ресурсів для розроблення й супроводу декарбонізаційних проєктів;
- залежність ефекту окремих заходів від зовнішніх умов - стану електромережі, доступності відновлюваної енергії та вторинної сировини.

Подолання цих бар'єрів потребує не лише зусиль самого підприємства, а й механізмів державної підтримки (пільгового фінансування, податкових стимулів та інформаційно-консультаційного супроводу), розгляд яких належить до прикладної частини дослідження.

Декарбонізація українських промислових підприємств відбувається в умовах, що суттєво відрізняються від європейських, і це визначає особливості пріоритетів для вітчизняних алюмінієвих МСПП.

Першою особливістю є технологічна спадщина галузі. Значна частина промислових потужностей України збудована ще за радянських часів, коли питання економії енергоресурсів та екологічності виробництва мали другорядне значення; тривалий час низька вартість ресурсів не стимулювала власників інвестувати в енергоефективність та екологічну модернізацію [74]. Наслідком є низький вихідний рівень енерго- та екомодернізації, що, з одного боку, означає високу вуглецеву інтенсивність продукції, а з іншого - значний потенціал скорочення викидів за рахунок порівняно простих заходів енергоефективності.

Другою особливістю є вплив повномасштабної війни. Руїнування енергетичної інфраструктури, дефіцит генеруючих потужностей та нестабільність електропостачання створюють додаткові обмеження для декарбонізації, значна частина якої спирається саме на електрифікацію та доступ до стабільної відновлюваної електроенергії. Водночас повоєнне відновлення промисловості розглядається як можливість для технологічного оновлення на сучасній низьковуглецевій основі, за якої енергоефективність має стати невід'ємною складовою відбудови [72].

Третьою особливістю є експортна орієнтація. Українська металургія традиційно орієнтована на зовнішні ринки, насамперед європейський, тому запровадження СВМ безпосередньо впливає на її конкурентоспроможність. Дослідники наголошують, що адаптація галузі до нових екологічних вимог потребує модернізації підприємств, залучення інвестицій та розвитку «зеленої» енергетики [46]. Для МСПП це означає, що декарбонізація є не відкладеним завданням, а умовою збереження присутності на ключових ринках збуту.

Четвертою особливістю є інституційне середовище. На відміну від ЄС, де діють розгалужені механізми підтримки декарбонізації (фонди справедливого переходу, галузеві програми, доступне «зелене» фінансування),- в Україні система таких інструментів перебуває на етапі формування. Це означає, що українські МСПП мають реалізовувати декарбонізацію переважно власними силами, спираючись насамперед на заходи з від'ємною вартістю скорочення викидів, які не потребують зовнішнього фінансування. Водночас процес адаптації національного законодавства до екологічних стандартів ЄС у межах євроінтеграції поступово формує регуляторні та фінансові передумови для масштабнішої декарбонізації, що в перспективі розширить доступні для МСПП напрями.

Сукупно зазначені особливості формують для українських алюмінієвих МСПП специфічну ситуацію: високий потенціал скорочення викидів за рахунок енергоефективності та циркулярності поєднується із серйозними обмеженнями щодо капіталомістких та електрозалежних напрямів декарбонізації. Це безпосередньо визначає структуру пріоритетів.

Узагальнення проведеного аналізу дає змогу сформулювати ієрархію пріоритетів декарбонізації алюмінієвих МСПП, побудовану за критерієм поєднання потенціалу скорочення викидів з економічною доцільністю та реалістичністю впровадження.



Рис. 1.8. Трирівнева ієрархія пріоритетів декарбонізації алюмінієвих МСПП

Джерело: побудовано автором.

Пріоритетність напряму декарбонізації визначається поєднанням трьох параметрів: потенціалу скорочення викидів (наскільки суттєво захід знижує вуглецеву інтенсивність продукції), економічної доцільності (співвідношення витрат і вигід, виражене граничною вартістю скорочення викидів) та реалістичності впровадження для МСПП (поріг входу, капіталомісткість, залежність від зовнішніх умов). Напряму отримує вищий пріоритет тоді, коли він одночасно забезпечує помітне скорочення викидів, має від’ємну або низьку вартість і є реалістичним для підприємства з обмеженими ресурсами. Саме поєднання цих трьох параметрів, а не кожного окремо, визначає послідовність заходів: технологічно потужний, але капіталомісткий і ресурсозалежний напрям отримує нижчий пріоритет, ніж менш масштабний, але дешевий і доступний.

Пріоритет першого рівня - енергоефективність та циркулярність. Це заходи переважно з від’ємною або низькою вартістю скорочення викидів, що одночасно знижують собівартість продукції, мають низький поріг входу та не

потребують значних капіталовкладень. Для українських МСПП, які мають високий вихідний потенціал економії ресурсів і працюють переважно у вторинному сегменті, ці напрями є водночас найбільш результативними та найменш ризикованими.

Пріоритет другого рівня - поетапна інтеграція відновлюваної енергії. Перехід на відновлювану електроенергію суттєво скорочує викиди Scope 2, проте для українських МСПП його реалізація обмежена станом електромережі та наслідками воєнних руйнувань. Тому цей напрям доцільно впроваджувати поетапно - від договорів постачання «зеленої» енергії до власної генерації - у міру стабілізації енергосистеми.

Пріоритет третього рівня - капіталомістка технологічна модернізація. Електрифікація теплових процесів, інертні аноди та технології уловлювання вуглецю мають значний потенціал, проте характеризуються високою капіталомісткістю та тривалим періодом окупності. Для МСПП ці напрями є довгостроковим орієнтиром, реалізація якого потребує механізмів державної підтримки та сприятливого інвестиційного середовища.

Запропонована ієрархія пріоритетів має не директивний, а орієнтовний характер: конкретна послідовність заходів для окремого підприємства уточнюється на основі економічної пріоритизації із застосуванням кривої граничних витрат на скорочення викидів та з урахуванням індивідуальних умов. Принциповим є те, що пріоритети декарбонізації узгоджені з критеріями економічної ефективності, сформованими у підрозділі 1.2: заходи першого рівня безпосередньо покращують економічні та екологічні критерії одночасно.

Технологічні напрями декарбонізації, розглянуті вище, не реалізуються автоматично - їх упровадження потребує відповідної організаційної основи. Такою основою є система енергетичного менеджменту, що перетворює окремі енергоощадні заходи на безперервний керований процес.

Систематичні дослідження енергоменеджменту в промисловості засвідчують, що результативність енергоощадних заходів визначається не лише технічними рішеннями, а й організаційними та поведінковими чинниками -

розподілом відповідальності, якістю обліку енергоспоживання, мотивацією персоналу. Інтегративні концептуальні рамки енергоменеджменту поєднують ці аспекти в єдину систему, що дає змогу системно виявляти й реалізовувати потенціал енергоефективності [41]. Для алюмінієвих МСПП це означає, що навіть заходи з від'ємною вартістю скорочення викидів не будуть реалізовані без належної організаційної підтримки - регулярного енергоаудиту, моніторингу питомих витрат та закріплення відповідальності за енергоефективність.

Міжнародним стандартом, що формалізує систему енергетичного менеджменту, є ISO 50001 [51]. Він встановлює вимоги до запровадження, підтримання та постійного поліпшення системи управління енергоспоживанням на основі циклу постійного вдосконалення. Запровадження такої системи дає підприємству структурований механізм для систематичного зниження енергоємності, а отже - і вуглецевого сліду. Для МСПП повна сертифікація за ISO 50001 не завжди є економічно виправданою, проте застосування його базових принципів - енергетичного планування, встановлення базових рівнів споживання, моніторингу та аналізу відхилень - є доцільним незалежно від наявності сертифіката.

Таким чином, енергетичний менеджмент виступає сполучною ланкою між технологічними напрямками декарбонізації та управлінським блоком системи критеріїв: він забезпечує, що виявлений потенціал скорочення викидів буде реалізований на практиці, а не залишиться лише розрахунковою величиною.

Декарбонізація як керований процес неможлива без достовірного вимірювання її результату - вуглецевого сліду продукції. Принцип «неможливо керувати тим, що не вимірюється» має для декарбонізації пряме застосування: без системи моніторингу викидів підприємство не може ні оцінити ефект упроваджених заходів, ні підтвердити свою вуглецеву ефективність перед зовнішніми сторонами.

Кількісне оцінювання викидів парникових газів здійснюється на основі міжнародно визнаних методологій. Найбільш поширеними є GHG Protocol, що визначає принципи обліку викидів за категоріями Scope 1, 2 і 3 [89], та стандарт

ISO 14064 [49], який встановлює вимоги до кількісного визначення та звітування про викиди й поглинання парникових газів на рівні організації. Базовий принцип розрахунку полягає у множенні обсягу діяльності - спожитого палива, електроенергії, сировини - на відповідні емісійні фактори. Для викидів Scope 2 застосовують два підходи: на основі середнього емісійного фактора енергосистеми та на основі фактичної структури закупленої електроенергії, що дає змогу врахувати ефект договорів постачання відновлюваної енергії [185].

Запровадження механізму CBAM суттєво підвищує вимоги до якості даних про вуглецевий слід. Якщо раніше облік викидів був для більшості МСПП добровільним, то для експорту до ЄС достовірне вимірювання питомих викидів продукції стає обов'язковою умовою. Це означає потребу у запровадженні відповідних облікових процедур, а в перспективі - і незалежної верифікації даних. Для малих і середніх підприємств це створює додаткове організаційне навантаження, проте водночас формує інформаційну основу для управління декарбонізацією: системний облік викидів є передумовою як побудови кривої граничних витрат, так і моніторингу прогресу за екологічними критеріями.

Слід зауважити, що достовірність моніторингу вуглецевого сліду є також передумовою запобігання практикам екологічного маркетингу, не підкріпленого реальними результатами. Верифікована, прозора звітність про викиди підвищує довіру споживачів та інвесторів і перетворює досягнення декарбонізації на актив, що має економічну цінність. Це остаточно пов'язує моніторинг вуглецевого сліду з управлінським та економічним блоками системи критеріїв.

Розглянуті пріоритети декарбонізації доцільно співвіднести із системою критеріїв оцінювання економічної ефективності МСПП, сформованою у підрозділі 1.2. Таке співвіднесення засвідчує, що декарбонізація не є окремим, відособленим завданням, а органічно вбудовується в усі чотири блоки системи критеріїв.

У межах економічного блоку (Econ) декарбонізаційні заходи першого рівня - енергоефективність і циркулярність - безпосередньо покращують ключові показники: знижують частку енерговитрат у собівартості, зменшують енерговартість одиниці продукції та скорочують сировинні втрати. Це підтверджує

тезу про те, що декарбонізація для МСПП є чинником, а не обмеженням економічної ефективності.

В екологічному блоці (E) декарбонізація відображається найбільш повно: питома вуглецева інтенсивність продукції, частка відновлюваних джерел енергії, енергоємність плавлення та рівень циркулярності є водночас і критеріями екологічної результативності, і показниками прогресу декарбонізації. Це означає, що моніторинг декарбонізації не потребує окремої системи показників - він здійснюється в межах уже сформованих екологічних критеріїв.

Управлінський блок (G) охоплює інституційні передумови декарбонізації: наявність дорожньої карти скорочення викидів, зрілість систем енергетичного менеджменту та частку «зеленого» капіталу в інвестиціях. Саме якість управління визначає, чи буде потенціал декарбонізації, виявлений за допомогою кривої граничних витрат, реалізований на практиці.

Соціальний блок (S) пов'язаний з декарбонізацією опосередковано - через вплив технологічної модернізації на умови та безпеку праці, а також через потребу в розвитку компетенцій персоналу для впровадження нових технологій. Таким чином, декарбонізація постає наскрізним процесом, що пронизує всю систему критеріїв оцінювання економічної ефективності МСПП.

Підсумовуючи, проведений аналіз дає підстави трактувати декарбонізацію алюмінієвих МСПП як стратегічний напрям, що інтегрує екологічні та економічні цілі. Виявлені проблеми (технологічні бар'єри високотемпературного плавлення, інвестиційні обмеження малих підприємств, нерозвиненість національних механізмів підтримки та наслідки воєнних руйнувань) не заперечують доцільності декарбонізації, а визначають реалістичну послідовність її здійснення. Запропонована трирівнева ієрархія пріоритетів дає змогу узгодити амбітність кліматичних цілей з ресурсними можливостями МСПП та забезпечити, щоб кожен крок декарбонізації одночасно покращував економічні результати підприємства.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У розділі сформовано теоретико-методологічні засади дослідження економічної ефективності малих і середніх промислових підприємств з позицій сталого розвитку, що дало змогу узагальнити такі результати.

Систематичний бібліографічний аналіз наукового доробку за базами Scopus та Web of Science Core Collection засвідчив стійке зростання дослідницької активності у предметному полі «економічна ефективність - сталий розвиток» та дав змогу простежити еволюцію наукового дискурсу від ранньої екологічної критики індустріалізації до сучасних концепцій корпоративної сталості, ESG та циркулярної економіки. Попри ґрунтовність наявної теоретичної бази, аналіз виявив низку прогалин: окремі групи показників (фінансові, енергетичні, екологічні, операційні, соціальні) опрацьовано детально, проте бракує цілісної системи критеріїв, яка одночасно інтегрувала б усі виміри сталого розвитку, була адаптована до галузевої специфіки енергоємних МСПП і розглядала економічну ефективність не як зовнішній результат, а як внутрішню складову сталого розвитку. Саме ці прогалини визначили логіку подальшого дослідження.

Уточнено зміст базових категорій «економічна ефективність підприємства» та «сталий розвиток підприємства» стосовно мікрорівня. Обґрунтовано, що для енергоємних МСПП економічна ефективність має оцінюватися не ізольовано, а як результат збалансованого поєднання фінансових, екологічних та соціальних цілей за умови належної якості управління. Окремо враховано специфіку МСПП як суб'єктів оцінювання: обмеженість їхніх організаційних, кадрових та фінансових ресурсів робить пряме перенесення розгалужених корпоративних ESG-методик малопридатним і зумовлює потребу в компактній, придатній до поетапного впровадження системі критеріїв, що спирається переважно на дані первинного обліку.

Особливістю запропонованого підходу є те, що на відміну від класичної триблокової ESG-моделі економічну складову виокремлено в самостійний, четвертий блок критеріїв, а не розчинено у складі управлінського виміру. Таке

рішення зумовлене тим, що для енергоємних виробництв критичних матеріалів економічна результативність є не наслідком, а внутрішнім чинником сталого розвитку, без якого реалізація екологічних і соціальних цілей стає неможливою. На цій основі сформовано чотириблокову систему критеріїв оцінювання економічної ефективності МСПП (економічний, екологічний, соціальний та управлінський блоки), що поєднує господарську результативність із показниками вуглецевої інтенсивності, циркулярності, безпеки праці та інституційної спроможності й узгоджена з вимогами міжнародних стандартів і регуляторного середовища ЄС.

Запропоновану систему критеріїв побудовано як цілісну багаторівневу модель оцінювання, що передбачає визначений спосіб переходу від окремих показників до узагальнених оцінок: нормування забезпечує зіставність різнорідних показників-стимуляторів і дестимуляторів; зважене агрегування - формування блокових індексів; спеціалізований інтегральний індекс утилізаційної ефективності - суму циркулярних показників; таксономічний підхід - обчислення інтегральної оцінки. При цьому таксономічна оцінка характеризує рівень (стан) сталого розвитку, а вибір і ранжування альтернативних управлінських рішень доцільно здійснювати за інтегральним індексом IESG-E. Така ієрархічна побудова дає змогу аналізувати ефективність підприємства як деталізовано (на рівні окремих критеріїв), так і узагальнено. Систему сформовано на засадах принципів комплексності, вимірюваності, галузевої адаптованості, ієрархічності, зіставності в часі та реалістичності для МСПП, що забезпечує її придатність не лише як теоретичної конструкції, а й як практичного управлінського інструмента.

Декарбонізацію алюмінієвих МСПП обґрунтовано трактувати не як зовнішнє регуляторне обмеження, а як напрям підвищення економічної ефективності. Це трактування має подвійне підґрунтя: значна частина заходів декарбонізації (підвищення енергоефективності, скорочення втрат, збільшення частки вторинної сировини) має від'ємну вартість скорочення викидів і одночасно знижує собівартість продукції, а в умовах вуглецевого ціноутворення та механізму СВAM вуглецевий слід продукції безпосередньо впливає на її ціну і доступ до ринків.

Унаслідок цього декарбонізація та економічна ефективність постають для сучасного промислового МСПП взаємодоповнюваними, а не конфліктними цілями.

З урахуванням структури вуглецевого сліду алюмінієвого виробництва, специфіки сегмента вторинної переробки та особливостей українського контексту (технологічна спадщина галузі, вплив повномасштабної війни, експортна орієнтація та нерозвиненість національних механізмів підтримки) запропоновано трирівневу ієрархію пріоритетів декарбонізації алюмінієвих МСПП. Її особливістю є те, що пріоритетність наряду визначається не окремим параметром, а поєднанням трьох: потенціалу скорочення викидів, економічної доцільності та реалістичності впровадження для підприємства з обмеженими ресурсами. Відповідно до цього критерію першочерговими для МСПП визначено енергоефективність і циркулярність, другий рівень - поетапну інтеграцію відновлюваної енергії, третій - капіталомістку технологічну модернізацію. Запропонована ієрархія має орієнтовний, а не директивний характер.

Показано, що декарбонізація не є відособленим завданням, а наскрізним процесом, який органічно вбудовується в усі чотири блоки сформованої системи критеріїв: безпосередньо покращує показники економічного блоку, найповніше відображається в екологічному, спирається на інституційні передумови управлінського та опосередковано пов'язана із соціальним блоком через вплив технологічної модернізації на умови праці. Сполучною ланкою між технологічними напрямками декарбонізації та управлінським блоком визначено систему енергетичного менеджменту, а передумовою керованості процесу - достовірний моніторинг вуглецевого сліду продукції.

Загалом сформовані у розділі теоретико-методологічні засади (уточнений категоріальний апарат, чотириблокова система критеріїв із виокремленим економічним блоком, багаторівнева модель агрегування та трирівнева ієрархія пріоритетів декарбонізації) утворюють цілісну основу для подальшого емпіричного аналізу тенденцій і проблем забезпечення економічної ефективності промислових підприємств на засадах сталого розвитку.

РОЗДІЛ 2

ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ НА ЗАСАДАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ (НА ПРИКЛАДІ ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЮ)

2.1. Тенденції розвитку алюмінієвої галузі в контексті врахування вимог сталого розвитку

Для енергоємних МСПП, зокрема ливарних та алюмінієвих, економічна ефективність є невіддільною від показників сталого розвитку та критеріїв ESG. Сформована у розділі 1 чотириблокова система критеріїв та обґрунтована трирівнева ієрархія пріоритетів декарбонізації утворюють теоретико-методологічну основу для кількісного емпіричного аналізу. Подальший розвиток дослідження потребує інструментарію, який дає змогу одночасно врахувати економічні, екологічні та соціальні характеристики діяльності галузі й сформувати на їх основі інтегральні оцінки сталого розвитку.

Метою цього підрозділу є виявлення сучасних тенденцій розвитку алюмінієвої галузі у контексті вимог сталого розвитку та емпірична оцінка рівня її сталості на основі таксономічного аналізу. Досягнення цієї мети передбачає послідовне вирішення трьох завдань:

- 1) визначення місця алюмінієвого виробництва серед інших промислових галузей за рівнем вуглецевої інтенсивності та структурою енергоспоживання;
- 2) обґрунтування доцільності застосування таксономічного методу як інструмента інтегрального оцінювання сталого розвитку;
- 3) проведення таксономічного аналізу та інтерпретація його результатів окремо за економічним, екологічним і соціальним блоками показників.

Алюмінієва промисловість належить до тих секторів світової економіки, де поєднуються стабільне зростання попиту на продукцію та значний екологічний слід виробництва. Згідно з міжнародними прогнозами, у найближчі десятиліття глобальний попит на первинний алюміній може зрости приблизно на 40 %, а обсяги переробки брухту - більш ніж утричі до 2050 року [78]. Таку динаміку зумовлюють розширення галузей-споживачів: будівництва, транспортного машинобудування,

електротехніки та пакувальної індустрії, а також інтенсивні процеси урбанізації. Особливістю поточного етапу є подвійна роль металу у низьковуглецевому переході: будучи енергоємним та емісійно інтенсивним матеріалом, алюміній водночас належить до критичних матеріалів енергетичного переходу, оскільки широко застосовується у виробництві сонячних панелей, вітрових установок, електромобілів та елементів електромереж.

Водночас алюмінієве виробництво характеризується надзвичайно високою енергоємністю та вуглецевою інтенсивністю. До 70 % викидів парникових газів у секторі пов'язані зі споживанням електроенергії на стадії електролітичного плавлення, а на галузь у цілому припадає близько 4 % світового споживання електроенергії [78, 79]. Значна частка цієї енергії у багатьох країнах досі виробляється на основі викопного палива, насамперед вугілля. Унаслідок цього алюмінієва промисловість є одночасно одним з найбільших промислових джерел парникових газів та одним із ключових резервів декарбонізації за рахунок переходу на відновлювані джерела енергії, підвищення енергоефективності й розширення переробки брухту.

Для коректного позиціонування алюмінієвого виробництва у системі промислових галузей доцільно зіставити його вуглецеву інтенсивність із показниками інших енергоємних секторів. Узагальнені дані щодо питомих викидів за основними промисловими маршрутами наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Вуглецева інтенсивність основних промислових галузей у порівнянні

Галузь / технологічний маршрут	Вуглецева інтенсивність, тCO ₂ e/т	Коментар
Алюміній первинний (вугільна генерація)	понад 20	Домінують непрямі викиди від електроенергії; найвищий показник серед розглянутих маршрутів
Алюміній первинний (середній світовий рівень)	12-17	1,5-2,0 тCO ₂ e/т припадає на процесні викиди від анодів та перфторвуглеців, решта - на електроенергію
Алюміній первинний (ГЕС / ВДЕ)	3-6	Найкращі показники нижче 4 тCO ₂ e/т за низьковуглецевого енергоміксу

Галузь / технологічний маршрут	Вуглецева інтенсивність, тCO ₂ е/т	Коментар
Аміак (паровий риформінг метану)	1,6-2,6	Процесне вивільнення CO ₂ у ході риформінгу
Сталь (доменно-конвертерний маршрут BF-BOF)	1,8-2,3	Традиційне доменне виробництво
Етилен	1,5-2,0	Типова оцінка для діючих процесів
Цемент	0,55-0,95	Значна частка - декарбонізація карбонату кальцію під час випалу
Сталь (електродугова піч EAF)	0,3-0,6	Висока частка брухту та відносно чиста електроенергія
Алюміній вторинний (переплав брухту)	0,3-0,6	Енергоспоживання близько 5 % від рівня первинного виробництва

Джерело: систематизовано автором за даними International Aluminium Institute [78],

International Energy Agency [79], World Steel Association [80] та Global Cement and Concrete Association [81].

Наведені у табл. 2.1 дані засвідчують, що первинне виробництво алюмінію за технологією Холла-Еру належить до найбільш вуглецеємних процесів сучасної промисловості. Для країн із переважно тепловою генерацією електроенергії сумарна вуглецева інтенсивність первинного алюмінію у межах Scope 1 і Scope 2 сягає 12-17 тCO₂е/т, а за домінування вугільних теплоелектростанцій може перевищувати 20 тCO₂е/т. За цим показником первинний алюміній випереджає цемент, сталь доменно-конвертерного маршруту та більшість процесів основної хімії, що пояснює особливу увагу міжнародних кліматичних ініціатив саме до алюмінієвого сектору. Графічне зіставлення вуглецевої інтенсивності основних промислових галузей наведено на рис. 2.1.

Принципово важливим є зіставлення первинного та вторинного маршрутів. Вуглецева інтенсивність вторинного алюмінію становить лише 0,3-0,6 тCO₂е/т, що в десятки разів нижче за показник первинного виробництва і відповідає рівню сталі електродугового маршруту. Це узгоджується з тим, що енергоспоживання переплаву брухту дорівнює приблизно 5 % від енергоспоживання первинного виробництва. Отже, поєднання циркулярної економіки з низьковуглецевою електроенергією дає змогу знизити викиди до рівня, нижчого за 1 тCO₂е/т

продукції, тобто до значень, сумісних із кліматичними сценаріями утримання потепління в межах 1,5-2 °С. Для малих і середніх підприємств, які переважно працюють у сегменті вторинної переробки та лиття, цей висновок має визначальне значення: він підтверджує сформоване у підрозділі 1.3 положення про циркулярність як центральний важіль декарбонізації МСПП.

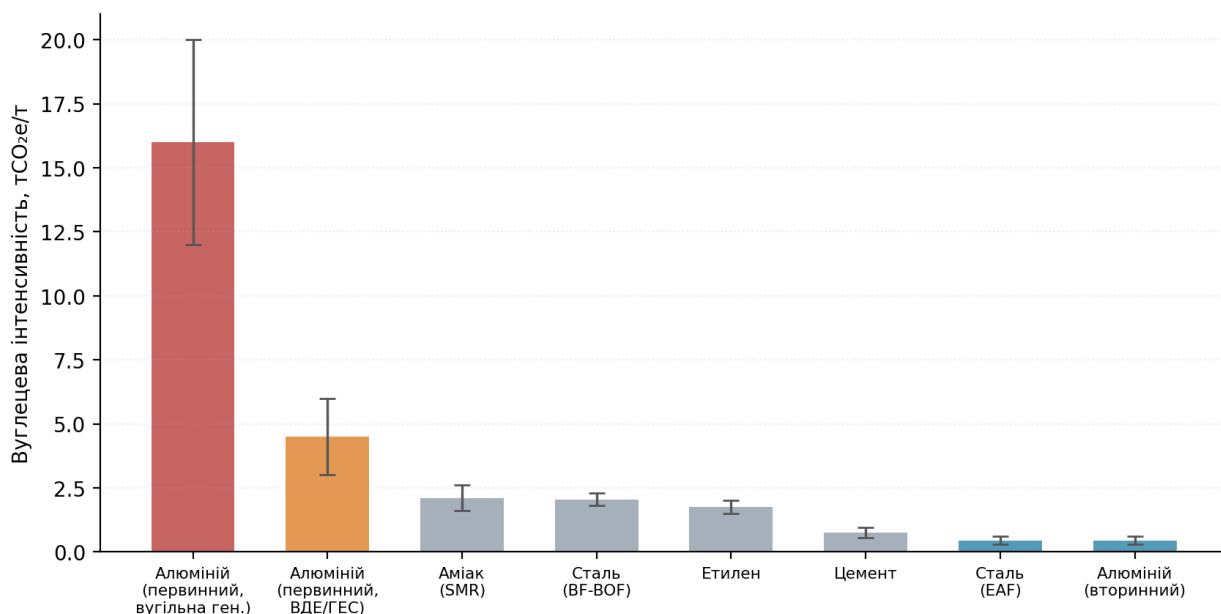


Рис. 2.1. Вуглецева інтенсивність основних промислових галузей, тCO₂е/т

Джерело: побудовано автором за даними табл. 2.1.

Структура енергоспоживання алюмінієвого виробництва суттєво різниться за регіонами. Регіони з високою часткою гідроенергетики та інших відновлюваних джерел (Європа, частина Північної та Південної Америки) демонструють найнижчі значення вуглецевої інтенсивності, близькі до 3-6 тCO₂е/т. Натомість у регіонах із домінуванням вугільної генерації, насамперед у значній частині Китаю та Індії, питомий вуглецевий слід первинного алюмінію є максимальним. Зростання світового виробництва алюмінію після 2000 року відбувалося переважно у Китаї, де близько 90 % електроенергії виробляється на вугільних теплоелектростанціях. Унаслідок цього частка відновлюваної та ядерної енергії в енергобалансі галузі скоротилася приблизно з 51 % у 2000 році до 28 % у 2019 році, а внесок непрямих викидів від виробництва енергії у загальний вуглецевий слід металу істотно зріс [78]. Це означає, що декарбонізація енергетичного сектору є

базовою передумовою для досягнення низьковуглецевого алюмінію, тоді як технологічні заходи на рівні електролізерів відіграють підтримувальну, але не визначальну роль.

Для України, де алюмінієве виробництво первинного металу фактично припинилося після зупинки Запорізького алюмінієвого комбінату у 2014 році, наведені закономірності означають подвійний висновок. З одного боку, країна втратила статус виробника первинного алюмінію та посилила імпортозалежність у стратегічному сегменті. З іншого боку, за наявності потенціалу низьковуглецевої гідрогенерації та значних обсягів вторинної сировини відновлення галузі на засадах енергоефективних і циркулярних технологій може стати одним із напрямів реалізації національної стратегії сталого розвитку. Саме тому подальший аналіз зосереджено на малих і середніх підприємствах вторинного та ливарного сегмента як на найбільш реалістичних носіях сталого зростання галузі в українських умовах.

Однією з ключових методологічних проблем оцінювання сталого розвитку є пошук балансу між якісними та кількісними підходами. Сталий розвиток описується множиною різномірних показників (економічних, екологічних, соціальних), які мають різні одиниці вимірювання, різну спрямованість впливу та різний масштаб значень. Безпосереднє зіставлення таких показників є некоректним, а їх роздільний аналіз не дає цілісної картини стану об'єкта. Розв'язання цієї проблеми пов'язане з побудовою синтетичних або інтегральних показників, які агрегують часткові ознаки в єдину узагальнену оцінку. Одним із найбільш відпрацьованих інструментів такого агрегування є таксономічний аналіз.

Назва методу походить від двох грецьких слів: «taxis» - розташування, порядок, та «nomos» - закон, правило. Таксономія розглядається як упорядкування та класифікація об'єктів у багатовимірному просторі ознак. Центральним поняттям методу є таксономічна відстань - міра відмінності між точками багатовимірного простору, що обчислюється за правилами аналітичної геометрії. Розмірність простору задається кількістю ознак, які характеризують досліджувані об'єкти. На основі матриці відстаней визначається взаємне положення кожного об'єкта щодо інших, що уможливорює їх упорядкування, групування та порівняльне оцінювання.

Методику побудови таксономічного показника рівня розвитку запропонував З. Хельвіг (Z. Hellwig) [82]; його підхід є основою багатьох сучасних досліджень сталого розвитку. Приклади застосування таксономічного аналізу до проблематики сталого розвитку представлено у працях Я. Єнджейчак-Гас (J. Jędrzejczak-Gas), А. Барської (A. Barska) та Й. Вирви (J. Wyrwa), присвячених таксономічному аналізу економічного розвитку Європейського Союзу [83], а також у дослідженні Дж. Деббарми (J. Debbarma) та Ю. Чоя (Y. Choi) щодо таксономії «зеленого» управління, де поєднано якісний і кількісний аналіз [84]. Методику розрахунку таксономічного показника детально розглянуто у роботах А. Чеха (A. Czech) стосовно сталого розвитку транспорту [85] та К. Худи-Лясковської (K. Chudy-Laskowska) щодо рівня розвитку вітроенергетики у країнах ЄС [86].

Принципове методологічне зауваження, що визначає логіку подальшого аналізу, сформульовано у праці К. Чеби (K. Cheba) та І. Бонк (I. Bąk) [87]: однією з найпоширеніших помилок у дослідженнях сталого розвитку є аналіз усіх ознак, що описують розвиток, у межах єдиного недиференційованого набору. Такий підхід не дає змоги виявити реальні зміни в кожній окремій сфері сталого розвитку, оскільки динаміка економічних, екологічних та соціальних показників може мати протилежну спрямованість, а їх агрегування в один показник взаємно нівелює різноспрямовані зрушення. Коректним рішенням є роздільний розрахунок таксономічного показника для кожної сфери з подальшим порівнянням результатів. Саме цей принцип покладено в основу проведеного нижче аналізу: таксономічний показник обчислюється окремо за економічним, екологічним і соціальним блоками, а інтегральна оцінка наводиться лише як допоміжна узагальнювальна характеристика.

Застосування таксономічного аналізу до ливарної та алюмінієвої галузей є обмеженим. Водночас у праці Й. Харальдссона (J. Haraldsson) та М. Йоганссона (M. T. Johansson) показано важливість таксономічного підходу для прийняття обґрунтованих рішень щодо інвестицій в енергоефективність та скорочення викидів парникових газів за умови наявності відповідних ключових показників ефективності й даних про кінцеве споживання енергії [88, 166]. Основною

перешкодою застосування методу у галузі є складність доступу до достовірних даних, оскільки не всі підприємства готові відкрито розкривати показники енергоспоживання та екологічного впливу. Це зумовлює доцільність використання агрегованих галузевих даних міжнародних організацій, насамперед International Aluminium Institute, як емпіричної основи аналізу [191].

Процедура побудови таксономічного показника за методом Хельвіга передбачає послідовне виконання шести етапів, узагальнених у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Послідовність проведення таксономічного аналізу

Етап	Зміст етапу
1	Формування матриці вихідних даних, що характеризують досліджувані об'єкти за обраною системою ознак
2	Стандартизація значень ознак для забезпечення їх зіставності
3	Поділ ознак на стимулятори та дестимулятори за характером впливу на рівень розвитку
4	Формування вектора-еталона розвитку для кожної функціональної складової системи
5	Розрахунок відстані між кожним об'єктом та вектором-еталоном розвитку
6	Обчислення таксономічного показника рівня розвитку та його інтерпретація

Джерело: складено автором за методикою З. Хельвіга [82].

Стандартизація значень ознак здійснюється за формулою (2.1):

$$z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / s_j \quad (2.1)$$

де x_{ij} - значення j -ї ознаки для i -го об'єкта;

$\bar{x}_j$ - середнє арифметичне значення j -ї ознаки;

s_j - стандартне відхилення j -ї ознаки.

Після стандартизації ознаки поділяють на стимулятори та дестимулятори. Стимуляторами вважають ознаки, зростання яких позитивно впливає на рівень розвитку об'єкта; дестимулятори - це ознаки, зростання яких має негативний вплив. На основі цього поділу формується вектор-еталон розвитку P_0 з координатами (2.2):

$$\begin{aligned} z_{0j} &= \max z_{ij} \text{ для стимуляторів;} \\ z_{0j} &= \min z_{ij} \text{ для дестимуляторів} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Відстань кожного об'єкта до вектора-еталона обчислюється за евклідовою метрикою (2.3):

$$c_{i0} = \sqrt{\sum_j (z_{ij} - z_{0j})^2} \quad (2.3)$$

Таксономічний показник рівня розвитку розраховується за формулою (2.4):

$$d_i^* = 1 - c_{i0} / c_0 \quad (2.4)$$

де нормувальна величина c_0 визначається як $c_0 = \bar{c} + 2s_0$;

$\bar{c}$ - середнє арифметичне відстаней c_{i0} ;

s_0 - стандартне відхилення відстаней.

Таксономічний показник d_i^* набуває значень у діапазоні від 0 до 1: чим ближче значення до одиниці, тим вищим є рівень розвитку об'єкта та тим ближчий він до еталона. Для змістовної інтерпретації результатів використано трирівневу шкалу: значення понад 0,66 відповідають високому рівню сталого розвитку, у межах 0,33-0,66 - середньому, нижче 0,33 - низькому.

Набір показників для таксономічного аналізу сформовано за логікою чотириблокової системи критеріїв, узгодженої з авторським підходом до інтегрального оцінювання альтернатив розвитку промислових підприємств на засадах ESG [77], з урахуванням доступності достовірних статистичних даних щодо алюмінієвої галузі. Управлінський блок до таксономічного розрахунку не включено, оскільки управлінські критерії мають переважно якісний характер і не представлені у вигляді зіставних кількісних рядів у галузевій статистиці. Таким чином, таксономічний аналіз охоплює три блоки: економічний, екологічний та соціальний, у складі 19 показників, наведених у табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Система показників для таксономічного аналізу сталого розвитку алюмінієвої галузі

Показник	Позначення	Характер впливу
Економічні показники		
Обсяг видобутку, тис. т	X1	стимулятор
Енергоємність виплавки первинного алюмінію, кВт·год/т	X2	дестимулятор
Загальне енергоспоживання виробництва, ГВт·год	X3	дестимулятор
Продуктивність праці, т / млн людино-годин	X4	стимулятор
Показник впливу енергоємності на викиди CO ₂	X5	дестимулятор
Екологічні показники		
Енергоспоживання первинної плавки - гідроенергія, ГВт·год	X6	стимулятор

Показник	Позначення	Характер впливу
Енергоспоживання - інші відновлювані джерела, ГВт·год	X7	стимулятор
Енергоспоживання - інші непоновлювані джерела, ГВт·год	X8	дестимулятор
Енергоспоживання - вугілля, ГВт·год	X9	дестимулятор
Енергоспоживання - нафта, ГВт·год	X10	дестимулятор
Енергоспоживання - природний газ, ГВт·год	X11	дестимулятор
Енергоспоживання - ядерна енергія, ГВт·год	X12	стимулятор
Викиди парникових газів алюмінієвого сектору, млн т CO ₂	X13	дестимулятор
Інтенсивність викидів первинного алюмінію, т CO ₂ /т	X14	дестимулятор
Соціальні показники		
Відпрацьовані людино-години, млн	X15	стимулятор
Lost Time Accident Rate (на млн людино-годин)	X16	дестимулятор
Restricted Work / Medical Treatment Rate (на млн людино-годин)	X17	дестимулятор

Джерело: складено автором за даними *International Aluminium Institute* [78].

Емпіричну базу аналізу становлять агреговані галузеві дані за період 2019-2022 років. Об'єктами таксономічного аналізу виступають окремі роки цього періоду, що дає змогу простежити динаміку рівня сталого розвитку галузі. Слід зауважити, що чотирирічний часовий діапазон є обмеженим для статистичних узагальнень; отримані результати тому інтерпретуються як оцінка короткострокової тенденції, а не як основа для довгострокового прогнозу. Розширення часового ряду та доповнення аналізу міжкраїновим зрізом визначено як напрям подальших досліджень.

Стандартизовані за формулою (2.1) значення показників та сформований відповідно до (2.2) вектор-еталон наведено у табл. 2.4. Для кожного показника зазначено його характер впливу, що визначає спосіб формування відповідної координати еталона.

Таблиця 2.4

Стандартизовані значення показників та вектор-еталон розвитку

Показник	2019	2020	2021	2022	Характер	Еталон z_0
X1	-1,13	-0,41	0,35	1,19	стим.	1,19
X2	0,76	0,59	0,09	-1,44	дестим.	-1,44

Показник	2019	2020	2021	2022	Характер	Еталон z_0
X3	-0,34	-0,70	-0,40	1,49	дестим.	-0,70
X4	0,38	-1,36	1,01	-0,03	стим.	1,01
X5	1,07	0,50	-0,34	-1,22	дестим.	-1,22
X6	-1,09	-0,29	0,05	1,32	стим.	1,32
X7	1,21	-0,24	-1,19	0,22	стим.	1,21
X8	0,19	0,86	0,39	-1,44	дестим.	-1,44
X9	0,16	-0,20	1,23	-1,19	дестим.	-1,19
X10	1,20	-0,86	-0,78	0,45	дестим.	-0,86
X11	0,48	-0,79	-0,87	1,18	дестим.	-0,87
X12	1,20	0,11	-0,06	-1,25	стим.	1,20
X13	0,55	0,76	0,13	-1,45	дестим.	-1,45
X14	1,05	0,51	-0,30	-1,25	дестим.	-1,25
X15	-0,90	1,15	-0,78	0,53	стим.	1,15
X16	0,50	-1,50	0,50	0,50	дестим.	-1,50
X17	1,41	-0,56	0,00	-0,84	дестим.	-0,84

Джерело: розраховано автором за формулами (2.1)-(2.2).

Відповідно до обґрунтованого вище принципу роздільного аналізу сфер сталого розвитку таксономічний показник d_i^* розраховано окремо за трьома блоками показників. Для кожного блоку за формулою (2.3) обчислено відстані об'єктів (років) до відповідного вектора-еталона, після чого за формулою (2.4) визначено таксономічний показник рівня розвитку. Зведені результати наведено у табл. 2.5. Інтегральний показник сталого розвитку галузі (підсумковий рядок табл. 2.5) обчислено за тією самою процедурою Хельвіга (формули (2.1)-(2.4)), застосованою спільно до повного (об'єднаного) набору показників усіх трьох блоків: вектор-еталон z_{0j} формується одночасно за всіма ознаками, а евклідову відстань до еталона $ci0 = \sqrt{(\sum_j (z_{ij} - z_{0j})^2)}$ обчислюють за об'єднаною множиною показників економічного, екологічного та соціального блоків, після чого застосовують формулу (2.4). Нижче значення інтегрального показника порівняно з блоковими відображає більшу сумарну відстань об'єкта до еталона за всім простором ознак, а не усереднення блокових оцінок.

Таблиця 2.5

Таксономічні показники сталого розвитку алюмінієвої галузі за блоками, 2019-2022 рр.

Блок показників	2019	2020	2021	2022
Економічний блок	0,177	0,196	0,593	0,501
Екологічний блок	0,083	0,187	0,159	0,350
Соціальний блок	0,230	0,941	0,387	0,557
Інтегральний показник	0,056	0,241	0,258	0,387

Джерело: розраховано автором за формулами (2.1)-(2.4).

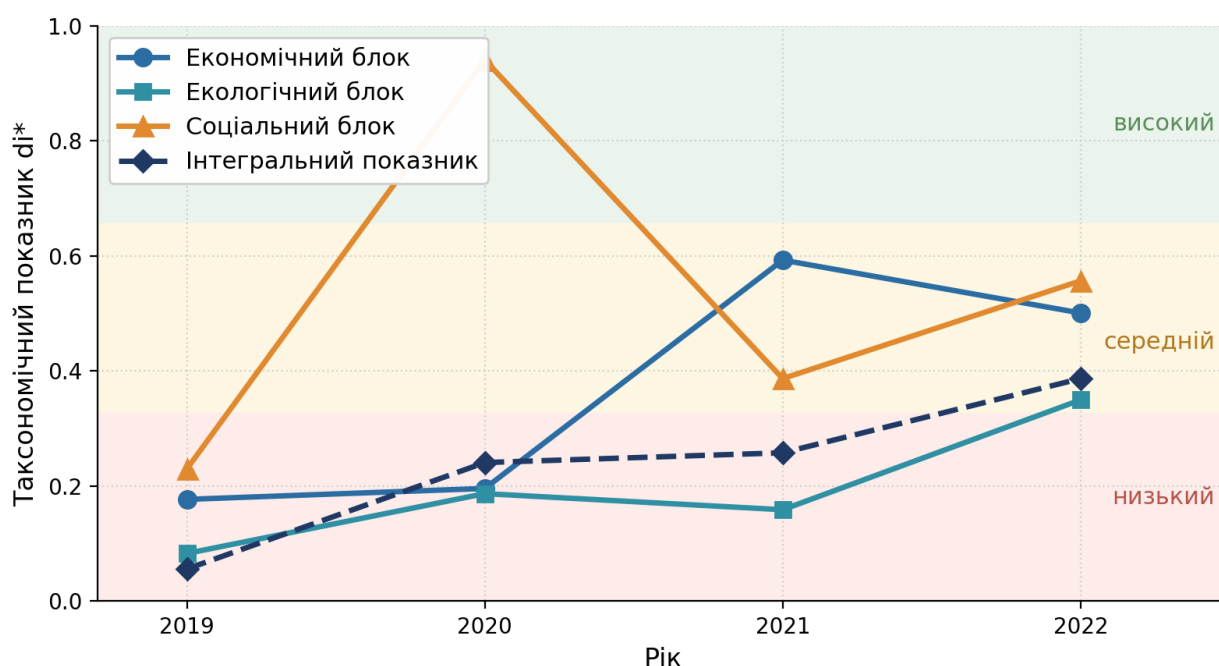


Рис. 2.2. Динаміка таксономічних показників сталого розвитку алюмінієвої галузі за блоками, 2019-2022 рр.

Джерело: побудовано автором за даними табл. 2.5.

Аналіз результатів, наведених у табл. 2.5 та на рис. 2.2, дає змогу сформулювати кілька змістовних висновків, причому роздільний розрахунок за блоками виявляє відмінності, які були б приховані за умови використання єдиного недиференційованого показника.

Економічний блок демонструє найвищі значення таксономічного показника серед усіх трьох сфер та загалом висхідну динаміку: показник зростає з 0,177 у 2019 році до максимуму 0,593 у 2021 році, після чого дещо знижується до 0,501 у

2022 році, тобто майже втричі (приблизно у 2,8 раза) перевищує рівень початку періоду. Така динаміка відображає одночасне збільшення обсягів видобутку та продуктивності праці за поступового зниження енергоємності виплавлення. Попри загальне покращення, наприкінці періоду показник залишається у межах середнього рівня, не досягаючи високих значень, а зниження у 2022 році свідчить про збереження резервів підвищення економічної результативності галузі.

Екологічний блок характеризується найнижчими значеннями таксономічного показника серед усіх трьох сфер та найповільнішим зростанням: з 0,083 у 2019 році до 0,350 у 2022 році. Динаміка є нерівномірною - у 2021 році зафіксовано зниження показника порівняно з 2020 роком, зумовлене несприятливою зміною структури енергоспоживання, зокрема зростанням частки вугільної генерації. Лише у 2022 році екологічний показник переходить нижню межу середнього рівня. Цей результат емпірично підтверджує сформоване у розділі 1 положення про екологічну, насамперед емісійну, складову як найбільш проблемний вимір сталого розвитку алюмінієвої галузі.

Соціальний блок демонструє найвищу волатильність. Аномально високе значення показника у 2020 році (0,941) пояснюється різким зниженням травматизму цього року, що, найвірогідніше, пов'язане зі скороченням виробничої активності в умовах пандемічних обмежень, а не зі сталим покращенням умов праці. Після 2020 року показник повертається до середнього рівня (0,387 у 2021 році та 0,557 у 2022 році). Цей приклад наочно ілюструє методологічну тезу К. Чеби та І. Бонк [87]: різноспрямована динаміка окремих сфер за умови їх агрегування в єдиний показник взаємно нівелювалася б, і аномалію соціального блоку 2020 року не було б виявлено.

Інтегральний показник, наведений у табл. 2.5 як допоміжна характеристика, зростає з 0,056 у 2019 році до 0,387 у 2022 році, відображаючи загальну позитивну тенденцію. Проте, як засвідчує блоковий аналіз, це узагальнене зростання приховує суттєву неоднорідність: стабільне покращення економічної сфери, повільне та нерівномірне зростання екологічної й нестабільну динаміку соціальної. Саме тому

інтегральний показник не може розглядатися як самодостатня оцінка - змістовні управлінські висновки забезпечує лише роздільний аналіз блоків.

Зіставлення результатів таксономічного аналізу зі сформованою системою критеріїв засвідчує їх узгодженість. Найнижчі значення екологічного блоку відповідають центральному місцю, яке у системі критеріїв відведено емісійним показникам, та підтверджують обґрунтований пріоритет декарбонізації. Стабільне зростання економічного блоку узгоджується з трактуванням економічної ефективності як внутрішнього чинника, а не наслідку сталого розвитку. Виявлена нестабільність соціального блоку вказує на потребу у відокремленні стійких покращень умов праці від кон'юнктурних коливань виробничої активності.

Отож, алюмінієве виробництво за технологією Холла-Еру належить до найбільш вуглецеємних промислових процесів, причому визначальним чинником його екологічного сліду є структура енергоспоживання, а не технологія електролізу як така. Це обґрунтовує орієнтацію українських МСПП на вторинний та ливарний сегмент, вуглецева інтенсивність якого на порядок нижча.

Таксономічний аналіз, проведений за коректною методикою з роздільним розрахунком за економічним, екологічним і соціальним блоками, засвідчив зростання рівня сталого розвитку галузі у 2019-2022 роках за збереження істотної міжсферової неоднорідності. Економічна сфера демонструє стійке покращення, екологічна - найнижчий рівень та найповільнішу динаміку, соціальна - високу волатильність. Отримані результати емпірично визначають екологічну, насамперед емісійну, складову як пріоритетний об'єкт подальшого поглибленого аналізу.

2.2. Екологічний слід виробництва алюмінію: прогнозування викидів CO₂ у світлі сучасних вимог декарбонізації економіки

Попередні результати засвідчили, що екологічна складова є найбільш проблемним виміром сталого розвитку алюмінієвої галузі: саме за екологічним блоком таксономічний показник набуває найнижчих значень та демонструє найповільнішу динаміку. Водночас декарбонізація для енергоємних виробництв є

не зовнішнім обмеженням, а напрямом підвищення економічної ефективності. Ці положення зумовлюють потребу у поглибленому аналізі екологічного, насамперед емісійного, сліду алюмінієвого виробництва та у кількісному прогнозуванні його динаміки.

Доцільним є аналіз структури вуглецевого сліду алюмінієвого виробництва та побудова прогнозу динаміки галузевих викидів діоксиду вуглецю на основі економіко-статистичного моделювання. Кількісне прогнозування викидів розглядається як необхідна передумова комплексного оцінювання сталого розвитку галузі: воно дає змогу оцінити інерційні тенденції екологічної результативності, виявити критичні відхилення від цілей декарбонізації та сформулювати інформаційну основу для встановлення цільових орієнтирів зниження вуглецевого сліду. Отримані прогнозні значення слугують вхідними даними для подальшої інтеграції екологічних показників у систему оцінювання економічної ефективності МСПП.

Алюміній є відносно молодим металом, проте за обсягами виробництва він перевищує сумарний випуск усіх інших кольорових металів. Технологічною основою первинного виробництва залишається електрохімічний процес Холла-Еру, запроваджений у 1886 році: він полягає в електролізі глинозему, розчиненого в розплавленому кріоліті, із застосуванням вуглецевих анодів. Попри високу ефективність та автоматизацію сучасних електролізерів, цей процес є джерелом значних викидів парникових газів. До викидів діоксиду вуглецю додаються перфторвуглеці, насамперед тетрафторметан, що утворюються в окремих режимах електролізу та характеризуються надзвичайно високим потенціалом глобального потепління.

Алюмінієва промисловість належить до найбільш енергоємних сегментів металургії: до 70 % викидів парникових газів у галузі зумовлені споживанням електроенергії на стадії електролітичного плавлення, значна частина якої у світі досі виробляється на основі викопного палива [78, 79]. Аналіз життєвого циклу засвідчує, що первинна виплавка та виробництво глинозему формують переважну частину галузевих викидів, причому споживання електроенергії є домінуючим

джерелом емісій. Саме тому вуглецевий слід первинного алюмінію критично залежить від структури енергетичного балансу: метал, вироблений на основі вугільної генерації, має у кілька разів вищу вуглецеву інтенсивність, ніж вироблений на основі гідроенергетики чи інших низьковуглецевих джерел.

Принципово важливою для малих і середніх підприємств є відмінність між первинним та вторинним виробництвом. Вторинне виробництво алюмінію (переплавлення брухту) потребує лише близько 5 % енергії, необхідної для виробництва первинного металу. За оцінками досліджень життєвого циклу, заміщення первинного алюмінію вторинним забезпечує скорочення вуглецевих викидів приблизно на 96 % за одночасного зниження витрат [78]. Це означає, що для алюмінієвих МСПП, які переважно працюють у сегменті вторинної переробки та лиття, циркулярність є водночас екологічним та потужним економічним важелем декарбонізації. Водночас декарбонізація вторинного виробництва має власний технологічний бар'єр: потребу у високотемпературному плавленні брухту, забезпечення якого низьковуглецевими джерелами теплоти залишається складним завданням.

Методологічною основою аналізу вуглецевого сліду галузі обрано напрацювання Асоціації алюмінію та Міжнародного інституту алюмінію [78], які з кінця XX століття здійснюють систематичні оцінки життєвого циклу продукції та публікують агреговані дані за підходом «від видобутку сировини до відвантаження продукції з заводу». Перші систематичні оцінки життєвого циклу алюмінієвих виробів було виконано наприкінці 1980-х років, а у 2000 році Міжнародний інститут алюмінію опублікував звіт на основі аналізу життєвого циклу глобального первинного алюмінію, згодом оновлений. Ці підходи узгоджуються з концепцією сталого розвитку та із сучасними практиками нефінансової звітності на засадах ESG.

Кількісне прогнозування викидів діоксиду вуглецю в алюмінієвому секторі дає змогу не лише оцінити поточний рівень та перспективну динаміку екологічної ефективності, а й виявити критичні тенденції, що можуть загрожувати досягненню цілей декарбонізації. Результати прогнозування слугують основою для формування

сценаріїв декарбонізації, узгоджених із цілями сталого розвитку та зобов'язаннями за Паризькою кліматичною угодою, та дають змогу зіставити можливі траєкторії скорочення викидів з наявними технологічними, фінансовими й інституційними обмеженнями.

Для прогнозування динаміки викидів у роботі застосовано модель авторегресії інтегрованого ковзного середнього (ARIMA), розроблену в межах підходу Бокса-Дженкінса (G. Box, G. Jenkins) [91]. Вибір цього інструменту зумовлений тим, що ARIMA-моделі поєднують авторегресивну компоненту, компоненту інтегрування (диференціювання) та компоненту ковзного середнього, що дає змогу перетворювати нестационарні часові ряди до стаціонарного вигляду, враховувати інерційність динаміки показника та інерційні шоки, а також будувати прогнози на основі власної минулої динаміки ряду. Модель ARIMA визначається трьома параметрами (p , d , q), де p - кількість авторегресивних членів, d - порядок диференціювання, необхідний для досягнення стаціонарності, q - кількість членів ковзного середнього.

У металургії ARIMA-моделі застосовують для прогнозування енергоємності, якості продукції, викидів парникових газів та ринкових показників [75]. Зокрема, цей інструмент використано для прогнозування енергоспоживання у сталеливарній промисловості, моделювання викидів діоксиду вуглецю у процесах виплавлення алюмінію, прогнозування цін на алюміній та споживання первинного металу. Безпосередньо до аналізу викидів діоксиду вуглецю в алюмінієвому секторі модель ARIMA застосовано у дослідженні Р. Гасанова (R. Hasanov), Дж. Сафарова (J. Safarov) та А. Сафарлі (A. Safarli) [90], які обґрунтовують доцільність інтеграції таких прогнозів у розроблення політик декарбонізації, узгоджених із зобов'язаннями за Паризькою угодою. Узагальнюючи, ARIMA-моделі є методологічно обґрунтованим інструментом оцінювання часових тенденцій екологічних показників та формування прогнозів для стратегічного планування сталого розвитку.

У дослідженні використано часовий ряд глобальних викидів діоксиду вуглецю, пов'язаних із життєвим циклом алюмінію (Aluminium Life-Cycle

Emissions, ALCE), за період 2005-2023 років. Джерелом інформації слугують публікації Міжнародного інституту алюмінію [78]; показники подано в мільйонах тонн CO₂-еквівалента. Динаміка ряду відображає, з одного боку, загальну тенденцію зростання обсягів виробництва алюмінію, а з іншого - поступову трансформацію енергетичного балансу галузі. Динаміку ряду наведено на рис. 2.3.

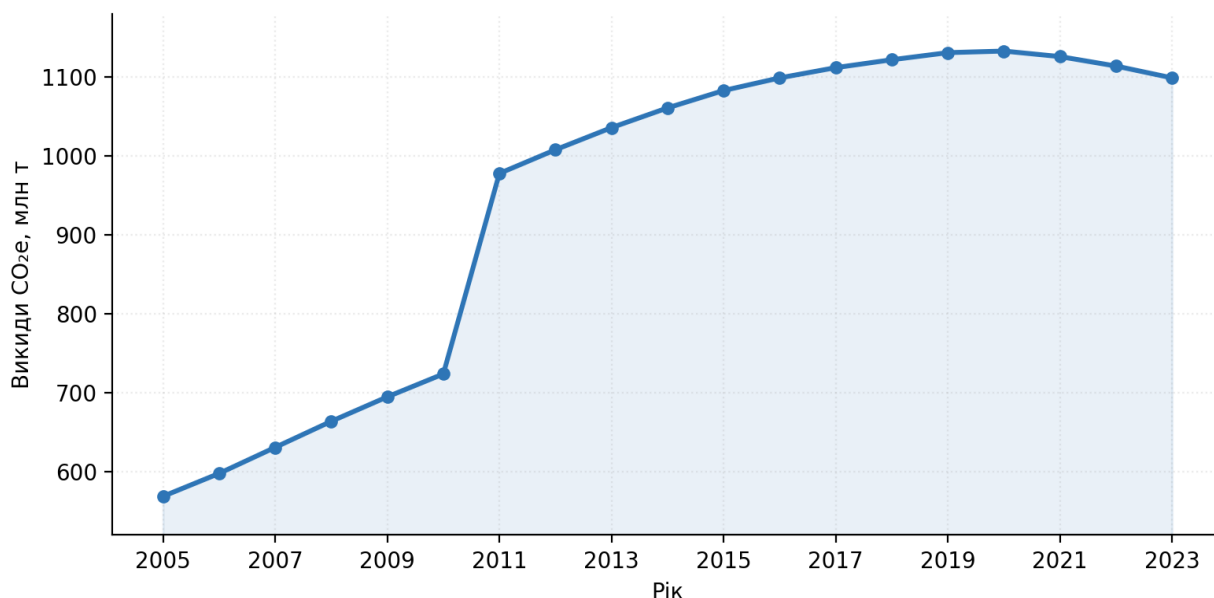


Рис. 2.3. Динаміка викидів CO₂, пов'язаних із життєвим циклом алюмінію, 2005-2023 рр., млн т

Джерело: побудовано автором за даними Міжнародного інституту алюмінію [78].

Первинну оцінку властивостей вибірки забезпечує описовий статистичний аналіз, результати якого наведено у табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Описова статистика часового ряду викидів CO₂ (ALCE), 2005-2023 рр.

Середнє	Медіана	Максимум	Мінімум	Ст. відхил.	Асиметрія	Ексцес
923,7	980,0	1133,0	569,0	189,72	-0,48	-1,21

Джерело: розраховано автором.

Згідно з даними табл. 2.6, значення викидів у період 2005-2023 років коливаються від 569 до 1133 млн. т. CO₂-еквівалента за середнього рівня 923,7 млн т. Від'ємна асиметрія (-0,48) та від'ємний ексцес (-1,21) вказують на сплюснений характер розподілу зі зміщенням у бік вищих значень, що відображає тривале

зростання обсягів галузевих викидів із поступовим уповільненням у завершальній частині періоду. Перевищення медіани над середнім підтверджує концентрацію спостережень на високому рівні впродовж останніх років. Виявлені характеристики засвідчують наявність вираженого тренду, що зумовлює необхідність застосування спеціалізованих методів аналізу часових рядів.

Стаціонарний часовий ряд характеризується сталими у часі математичним сподіванням, дисперсією та структурою автокореляцій. Для перевірки наявності одиничного кореня та виявлення нестационарності застосовано розширений тест Дікі-Фуллера (ADF-тест) та тест Філіпса-Перрона. Результати ADF-тесту для вихідного ряду засвідчили його нестационарність: значення статистики становить - 2,08 за р-значення 0,25, що не дає підстав відхилити гіпотезу про наявність одиничного кореня. Це відповідає наявності тренду, зумовленого зростанням обсягів виробництва та зміною технологічних параметрів галузі.

Для досягнення стаціонарності застосовано диференціювання першого порядку, що узгоджується з рекомендаціями підходу Бокса-Дженкінса [91]. Графік диференційованого ряду наведено на рис. 2.4.

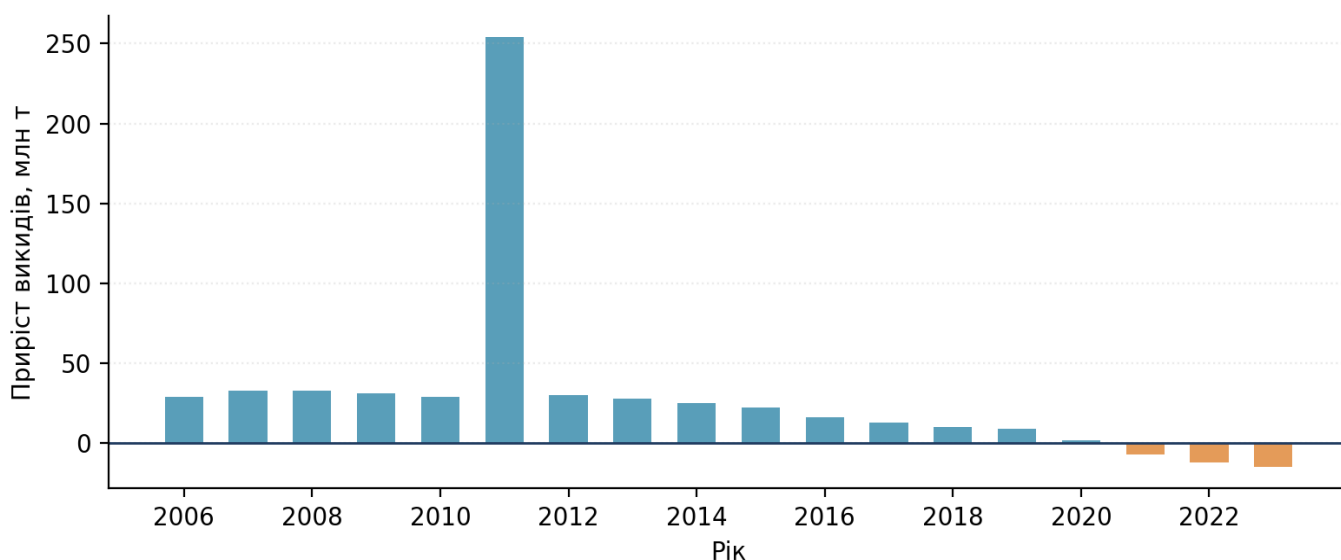


Рис. 2.4. Диференційований часовий ряд викидів CO₂ (перший порядок диференціювання)

Джерело: побудовано автором.

Графік диференційованого ряду демонструє коливання приростів викидів навколо нульового рівня за відносно стабільної амплітуди. Відсутність вираженого тренду після першого диференціювання дає підстави вважати отриманий ряд близьким до стаціонарного, що відповідає вимогам застосування моделей типу ARIMA. Наявність окремих різких стрибків відображає вплив зовнішніх шоків - коливань попиту, змін енергоміксу та регуляторних зрушень.

Порядок авторегресії та ковзного середнього визначено на основі аналізу автокореляційної (ACF) та часткової автокореляційної (PACF) функцій диференційованого ряду, наведених на рис. 2.5.

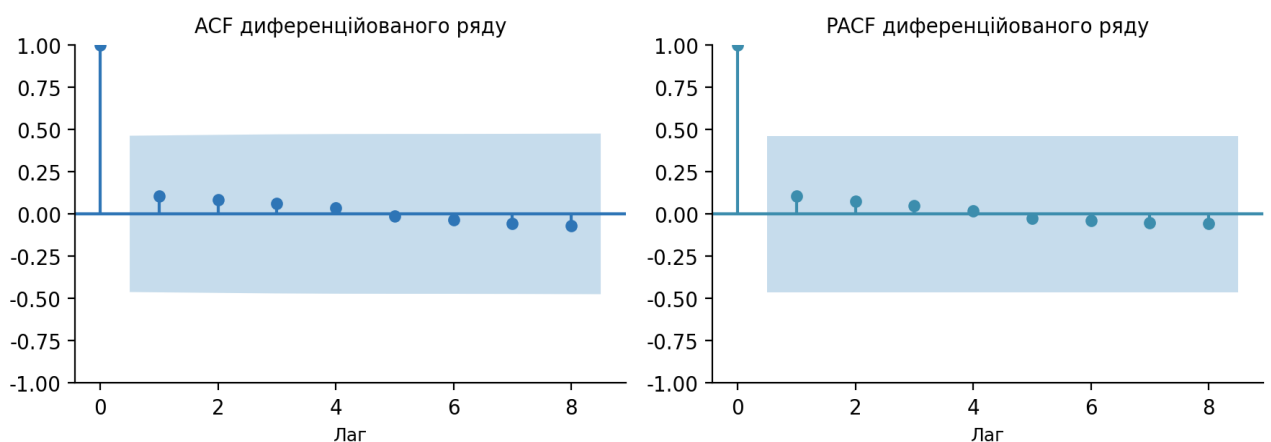


Рис. 2.5. Автокореляційна (ACF) та часткова автокореляційна (PACF) функції диференційованого ряду

Джерело: побудовано автором.

Графік ACF засвідчує статистично значущі позитивні автокореляції на перших лагах та поступове згасання коефіцієнтів із зростанням лага, що є характерним для процесів з короткою пам'яттю та обґрунтовує включення до моделі компоненти ковзного середнього невисокого порядку. На графіку PACF істотними є перша та частково друга часткові автокореляції, тоді як подальші значення не виходять за межі довірчого інтервалу, що вказує на доцільність авторегресивної компоненти низького порядку. На основі аналізу ACF та PACF, а також за критеріями інформації Акаїке та Шварца обрано специфікацію ARIMA(2, 1, 2).

Загальний вигляд моделі ARIMA(p, d, q) подається рівнянням (2.5):

$$\Phi(L) (1 - L)^d y_t = \Theta(L) \varepsilon_t \quad (2.5)$$

де y_t - значення часового ряду (викиди CO₂ у період t); L - оператор зсуву; d - порядок диференціювання; $\Phi(L)$ та $\Theta(L)$ - поліноми операторів авторегресії та ковзного середнього; ε_t - випадкова похибка (білий шум).

Результати оцінювання моделі ARIMA(2, 1, 2) для часового ряду викидів CO₂ наведено у табл. 2.7 [75].

Таблиця 2.7

Результати оцінювання моделі ARIMA(2, 1, 2)

Параметр	Коефіцієнт	Ст. похибка	z-статистика	p-значення
ar.L1	0,219	0,514	0,425	0,671
ar.L2	0,725	0,416	1,742	0,082
ma.L1	0,208	105,153	0,002	0,998
ma.L2	-0,791	83,152	-0,010	0,992
sigma ²	1254,80	131000,00	0,010	0,992

Джерело: розраховано автором. Кількість спостережень - 19; AIC = 191,58; BIC = 196,04; HQIC = 192,20; логарифм правдоподібності = -90,79.

Діагностичні характеристики моделі наведено у табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Діагностичні тести моделі ARIMA(2, 1, 2)

Тест / характеристика	Значення	Інтерпретація
Тест Льюнга-Бокса (Q)	0,91	Автокореляція залишків відсутня
Тест Жарка-Бера (p-значення)	0,92	Розподіл залишків близький до нормального
Тест на гетероскедастичність (p-значення)	0,03	Наявні зміни дисперсії залишків у часі
Асиметрія залишків	-0,13	Незначна
Екセス залишків	2,62	Близький до нормального

Джерело: розраховано автором.

Аналіз результатів оцінювання дає змогу сформулювати кілька висновків. Обрана специфікація ARIMA(2, 1, 2) узгоджена з попереднім аналізом ACF та PACF і забезпечує прийнятну якість опису диференційованого ряду; значення інформаційних критеріїв засвідчують, що модель не є переобтяженою параметрами для наявного обсягу спостережень. Діагностичні тести підтверджують коректність

специфікації: тест Льюнга-Бокса вказує на відсутність автокореляції залишків, а тест Жарка-Бера - на наближеність їх розподілу до нормального. Це є передумовою отримання незміщених прогнозів у коротко- та середньостроковому горизонті.

Водночас отримані результати потребують зваженого, критичного трактування з огляду на низку методологічних обмежень, які прямо впливають на надійність прогнозу та які доцільно прямо зазначити.

- обмежений обсяг вибірки. Модель оцінено на 19 річних спостереженнях. Для часових моделей такий обсяг є малим, що зумовлює низьку точність оцінок параметрів та широкі довірчі інтервали прогнозу;

- статистична незначущість коефіцієнтів. Оцінки параметрів ковзного середнього мають надзвичайно великі стандартні похибки та р-значення, близькі до одиниці, а оцінка авторегресивного параметра $ar.L1$ також є статистично незначущою (табл. 2.7). Це означає, що більшість коефіцієнтів моделі статистично невіддільні від нуля, а сама модель радше фіксує загальну інерційну форму ряду, ніж точно ідентифікує його структуру;

- гетероскедастичність залишків. Тест на гетероскедастичність (р-значення 0,03) сигналізує про зміну дисперсії залишків у часі. Це порушує одну з передумов класичної ARIMA-моделі та зумовлює потребу обережно інтерпретувати довгострокові прогнози;

- екстраполяційний характер довгострокового прогнозу. Горизонт прогнозу до 2050 року у понад чотири рази перевищує довжину наявного ряду спостережень, що виходить за межі надійного застосування ARIMA-моделей.

З урахуванням зазначених обмежень результати моделювання трактуються диференційовано за горизонтом прогнозування. Прогноз на найближчі 5-7 років (приблизно до 2030 року) розглядається як надійна оцінка інерційної динаміки галузевих викидів. Прогноз на віддаленіший період до 2050 року трактується не як точний прогноз, а як ілюстративний інерційний сценарій, що показує траєкторію викидів за умови збереження наявних тенденцій без структурних зрушень.

На основі оціненої моделі побудовано прогноз траєкторії викидів CO₂ в алюмінієвому секторі. Результати прогнозування з 90% довірчим інтервалом наведено на рис. 2.6.

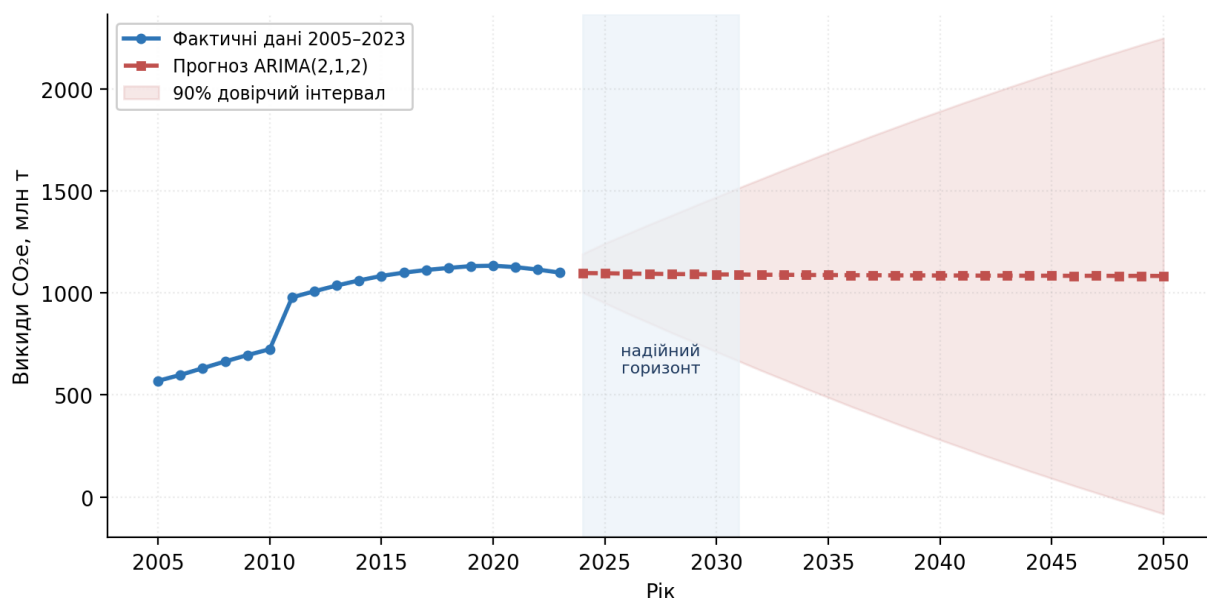


Рис. 2.6. Фактична динаміка та прогноз викидів CO₂ в алюмінієвому секторі до 2050 р., млн т

Джерело: побудовано автором за результатами моделювання ARIMA(2, 1, 2).

Графік прогнозу засвідчує, що за інерційної траєкторії розвитку алюмінієвого сектору очікується стабілізація сукупних викидів CO₂ на рівні приблизно 1083-1090 млн. т. з незначним зниженням у завершальній частині прогнозного горизонту. Прогнозна крива не відображає різкого перелому тренду: замість суттєвого абсолютного скорочення викидів відбувається лише уповільнення їх динаміки та вихід на квазістабільний рівень. Принципово важливою характеристикою прогнозу є поведінка довірчого інтервалу: у межах надійного горизонту до 2030 року він є відносно вузьким, проте з віддаленням прогнозного періоду стрімко розширюється, і до 2050 року його нижня межа наближається до нуля. Це наочно ілюструє сформульоване вище методологічне застереження: довгостроковий прогноз має сценарний, а не точковий характер.

Отримана інерційна траєкторія частково узгоджується з глобальними сценаріями «зеленого зростання», проте не забезпечує досягнення цілей нетто-нульових викидів до 2050 року як зовнішній орієнтир сталого розвитку. Розрив між інерційним сценарієм та цільовою траєкторією net-zero є кількісним вираженням того обсягу скорочення викидів, який має бути забезпечений за рахунок цілеспрямованих заходів декарбонізації - підвищення енергоефективності, переходу на відновлювані джерела енергії та розширення переробки брухту. Для МСПП, у т.ч. українських алюмінієвих та ливарних, це означає, що підвищення економічної ефективності на засадах ESG неможливе без випереджального впровадження заходів декарбонізації, а не лише адаптації до середньосвітових тенденцій.

Побудований прогноз виконує у дослідженні кілька функцій. Аналітична функція полягає у кількісній оцінці інерційних тенденцій вуглецевої інтенсивності галузі. Нормативно-цільова функція реалізується через формування бази для встановлення цільових орієнтирів декарбонізації, узгоджених із Паризькою угодою, Європейським зеленим курсом та механізмом СВМ. Інструментальна функція полягає у тому, що прогнозні значення викидів можуть використовуватися як екологічні змінні у системі оцінювання економічної ефективності МСПП. Практична функція для України пов'язана з тим, що для вітчизняних підприємств, орієнтованих на ринки ЄС, прогноз слугує орієнтиром щодо необхідних темпів скорочення вуглецевого сліду для збереження конкурентоспроможності в умовах дії СВМ.

Окремої уваги заслуговує контекст української алюмінієвої галузі. Припинення роботи Запорізького алюмінієвого комбінату у 2014 році засвідчило втрату країною статусу виробника первинного алюмінію та посилення імпортозалежності у стратегічному сегменті. За наявності потенціалу використання низьковуглецевої електроенергії гідроелектростанцій це може розглядатися як втрачене вікно можливостей для формування конкурентоспроможної та водночас низьковуглецевої галузі. Відновлення алюмінієвого виробництва на засадах енергоефективних та циркулярних

технологій може стати одним із напрямів реалізації національної стратегії сталого розвитку.

Тож, структура вуглецевого сліду алюмінієвого виробництва визначається переважно непрямыми енергетичними викидами, що зумовлює залежність екологічної результативності галузі від структури енергоспоживання. Вторинне виробництво алюмінію характеризується вуглецевою інтенсивністю, на порядок нижчою за первинне, що підтверджує циркулярність як ключовий напрям декарбонізації МСПП.

Проведене моделювання засвідчило, що ARIMA-моделі є методологічно придатним інструментом для опису та короткострокового прогнозування динаміки викидів CO₂ в алюмінієвому секторі. Водночас обмежений обсяг вибірки, статистична незначущість окремих коефіцієнтів та гетероскедастичність залишків зумовлюють потребу диференційованого трактування результатів: надійним є прогноз на горизонті до 2030 року, тоді як довгостроковий прогноз до 2050 року має статус ілюстративного інерційного сценарію. Цей сценарій засвідчує стабілізацію викидів без їх суттєвого абсолютного скорочення, що не відповідає цілям нетто-нульових викидів та обґрунтовує необхідність активних заходів декарбонізації. Перспективним напрямом подальших досліджень є поєднання моделі ARIMA з модифікаціями SARIMA та ARIMAX, а також з алгоритмами машинного навчання для врахування сезонних коливань і впливу зовнішніх факторів. Отримані результати формують основу для вибору управлінських рішень щодо забезпечення економічної ефективності підприємств.

2.3. Оцінка можливостей сталого економічного розвитку МСПП із застосуванням методів операційного менеджменту

Проведений у попередніх підрозділах аналіз стосувався галузевого рівня: таксономічне оцінювання сталого розвитку та прогнозування вуглецевого сліду характеризують алюмінієву галузь у цілому. Водночас сформульована концепція розглядає економічну ефективність як категорію, що формується насамперед на мікрорівні: у межах окремого підприємства, його операційних процесів та

управлінських рішень. Перехід від галузевих тенденцій до мікрорівневого аналізу потребує інструментарію, здатного кількісно оцінити внутрішні резерви підвищення ефективності МСПП. Таким інструментарієм є методи операційного менеджменту. Зазначені методи операційного менеджменту охоплюють планування ресурсів і запасів на рівні підприємства і слугують містком між галузевим та мікрорівневим аналізом.

Таким чином, доцільною є оцінка можливостей підвищення економічної ефективності МСПП на основі застосування методів операційного менеджменту, насамперед прогнозування попиту та планування потреби в матеріалах. Операційний менеджмент розглядається у дослідженні як управління процесами перетворення ресурсів на готову продукцію; його методи дають змогу оптимізувати використання матеріальних, трудових та фінансових ресурсів і безпосередньо впливають на собівартість продукції та рівень запасів. Зважаючи на те, що для МСПП обмеженість обігових коштів є одним із ключових чинників, що стримують розвиток, оптимізація операційних рішень становить істотний резерв підвищення економічної результативності.

У цьому підрозділі акцент зміщено на економічну складову сталого розвитку. Якщо підрозділ 2.2 розкривав екологічний вимір, то методи операційного менеджменту, розглянуті нижче, спрямовані передусім на економічну ефективність (зниження витрат, оптимізацію запасів та підвищення обґрунтованості планових рішень). Такий поділ відповідає сформованому розумінню сталого розвитку як багатовимірної категорії, окремі складові якої доцільно аналізувати роздільно, із застосуванням адекватного кожній складовій інструментарію.

Операційний менеджмент охоплює сукупність методів планування, організації та контролю виробничих процесів, спрямованих на ефективне перетворення ресурсів на готову продукцію. Для промислових підприємств, що працюють у сегменті лиття та оброблення металів, центральне місце серед таких методів посідають прогнозування попиту та планування потреби в матеріалах (Material Requirements Planning, MRP). Прогнозування попиту формує

інформаційну основу планування: воно дає змогу оцінити майбутні обсяги збуту й відповідно спланувати виробничу програму. Планування потреби в матеріалах, спираючись на прогноз попиту, визначає, які матеріали, у якій кількості та в які терміни мають бути замовлені для забезпечення безперебійного виробництва.

Економічна доцільність застосування цих методів зумовлена тим, що вони безпосередньо впливають на дві ключові статті витрат - витрати на замовлення (налагодження) та витрати на зберігання запасів. Зниження обсягів замовлень спричиняє часті закупівлі та зростання витрат на їх оформлення й налагодження виробництва; завищення - призводить до накопичення наднормативних запасів, заморожування обігових коштів та зростання витрат на зберігання. Пошук балансу між цими статтями витрат є класичною задачею операційного менеджменту, особливо актуальною для малих і середніх підприємств з обмеженими фінансовими ресурсами.

Для оцінки можливостей підвищення економічної ефективності у дослідженні застосовано двоетапну процедуру. На першому етапі будується прогноз попиту на продукцію підприємства з урахуванням тренду та сезонних коливань. На другому етапі на основі прогнозу попиту здійснюється планування потреби в матеріалах із порівнянням чотирьох методів визначення розміру партії: партія до партії, економічний розмір замовлення, метод найменших сукупних витрат та метод найменших питомих витрат. Зіставлення результатів цих методів, апробованих у попередніх дослідженнях автора [76], дає змогу визначити, який підхід забезпечує мінімальні сукупні витрати за конкретних умов діяльності підприємства.

Емпіричною основою аналізу слугують фактичні дані щодо помісячного попиту на алюмінієві виливки одного з вітчизняних малих промислових підприємств за дванадцять місяців 2022 року. З міркувань конфіденційності назву підприємства не розкрито. Динаміка попиту характеризується двома складовими: загальною тенденцією та вираженими сезонними коливаннями з піком у літні місяці, що типово для підприємств, орієнтованих на будівельну й машинобудівну галузі. Для побудови прогнозу застосовано адитивно-мультиплікативну модель, що поєднує лінійний тренд із сезонною компонентою.

Лінійний тренд описується рівнянням (2.6):

$$T_t = a_0 + a_1 \cdot t \quad (2.6)$$

де T_t - трендове значення попиту у період t ;

a_0 та a_1 - параметри тренду, що визначаються методом найменших квадратів.

Сезонний індекс для кожного періоду розраховується як відношення фактичного значення попиту до відповідного трендового значення за формулою (2.7):

$$I_t = y_t / T_t \quad (2.7)$$

де I_t - сезонний індекс періоду t ;

y_t - фактичне значення попиту.

Прогнозне значення попиту визначається як добуток трендового значення прогнозного періоду та відповідного сезонного індексу за формулою (2.8):

$$\hat{y}_t = T_t \cdot I_t \quad (2.8)$$

Результати побудови прогнозу попиту на наступні шість місяців наведено у табл. 2.9. Параметри лінійного тренду, оцінені методом найменших квадратів, становлять $a_0 = 156,74$ та $a_1 = 0,44$.

Таблиця 2.9

Прогноз попиту на алюмінієві виливки на шість місяців

Місяць	Трендове значення	Сезонний індекс	Прогноз попиту, шт.	Характеристика
13	162,5	0,60	98	Низький сезон
14	162,9	0,70	114	Низький сезон
15	163,4	0,82	134	Зростання попиту
16	163,8	1,04	170	Перехід до піку
17	164,2	1,32	217	Піковий сезон
18	164,7	1,51	248	Піковий сезон
Разом	-	-	981	-

Джерело: розраховано автором за формулами (2.6)-(2.8).

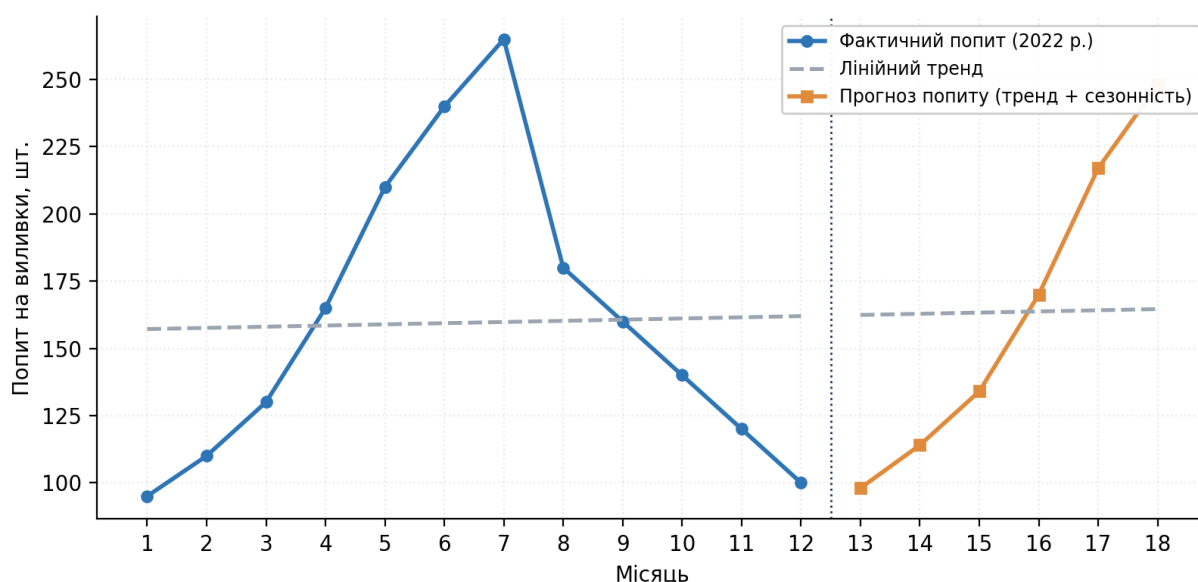


Рис. 2.7. Фактичний попит, лінійний тренд та прогноз попиту на алюмінієві
ВИЛИВКИ

Джерело: побудовано автором за даними табл. 2.9.

Як засвідчують дані табл. 2.9 та рис. 2.7, прогноз попиту відтворює виражену сезонність: значення сезонних індексів коливаються від 0,60 у низькому сезоні до 1,51 у піковий період. Сумарна прогнозна потреба на шість місяців становить 981 виливок за нерівномірного її розподілу: на два пікові місяці припадає близько 47 % сукупного попиту. Така нерівномірність є визначальною для подальшого планування потреби в матеріалах, оскільки саме вона зумовлює відмінності між методами визначення розміру партії: за рівномірного попиту вибір методу майже не впливає на витрати, тоді як за вираженої сезонності він стає істотним резервом їх оптимізації.

Спрогнозований попит є входним параметром для планування потреби в матеріалах. Чиста потреба у кожному з шести періодів дорівнює прогнозованому значенню попиту, наведеному в табл. 2.10. Завдання планування полягає у визначенні розміру та графіка замовлень, що забезпечують покриття цієї потреби з мінімальними сукупними витратами. Сукупні витрати включають дві складові: витрати на замовлення (налагодження) та витрати на зберігання запасів. Для розрахунків прийнято такі параметри: вартість одного замовлення (налагодження)

становить 400 дол., вартість зберігання однієї одиниці продукції протягом одного періоду 2 дол.

Метод «партія до партії» (Lot-for-Lot, L4L) передбачає замовлення в кожному періоді обсягу, що точно дорівнює чистій потребі цього періоду. За такого підходу запаси на кінець періоду відсутні, а витрати на зберігання дорівнюють нулю. Проте кожен період потребує окремого замовлення, що максимізує витрати на замовлення.

Економічний розмір замовлення (Economic Order Quantity, EOQ) визначає фіксований обсяг партії, що мінімізує суму витрат на замовлення та зберігання за припущення про рівномірний попит. Економічний розмір замовлення розраховується за формулою (2.9):

$$EOQ = \sqrt{2 \cdot D \cdot S / H} \quad (2.9)$$

де D - середня потреба за період;

S - вартість одного замовлення;

H - вартість зберігання одиниці продукції за період.

За наведеними параметрами розрахункове значення економічного розміру замовлення становить 256 одиниць.

Метод найменших сукупних витрат (Least Total Cost, LTC) передбачає послідовне об'єднання потреб суміжних періодів в одну партію доти, доки накопичені витрати на зберігання не наблизяться до витрат на одне замовлення. *Метод найменших питомих витрат (Least Unit Cost, LUC)* формує партію так, щоб мінімізувати витрати з розрахунку на одну одиницю продукції. Обидва методи є динамічними: на відміну від економічного розміру замовлення, вони враховують нерівномірність попиту в часі.

Результати застосування чотирьох методів визначення розміру партії до спрогнозованої потреби наведено у табл. 2.10.

Таблиця 2.10

Порівняння методів визначення розміру партії

Метод	Кількість замовлень	Витрати на замовлення, дол.	Витрати на зберігання, дол.	Сукупні витрати, дол.
Партія до партії (L4L)	6	2400	0	2400
Економічний розмір замовлення (EOQ)	4	1600	1396	2996
Найменші сукупні витрати (LTC)	4	1600	568	2168
Найменші питомі витрати (LUC)	4	1600	568	2168

Джерело: розраховано автором.

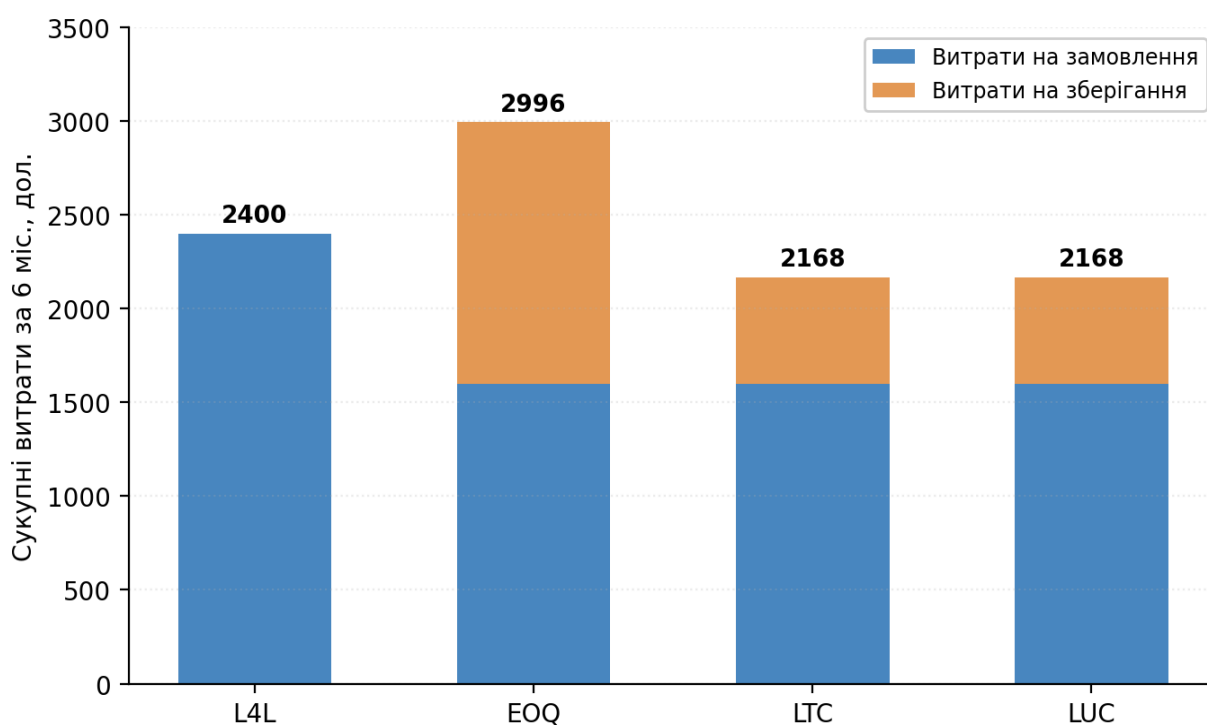


Рис. 2.8. Структура сукупних витрат за методами визначення розміру партії, дол.

Джерело: побудовано автором за даними табл. 2.10.

Порівняння результатів, наведених у табл. 2.10 та на рис. 2.8, дає змогу сформулювати кілька висновків. Метод «партія до партії» повністю усуває витрати на зберігання, проте через максимальну кількість замовлень забезпечує сукупні витрати на рівні 2400 дол. Економічний розмір замовлення, попри скорочення кількості замовлень до чотирьох, виявився найменш ефективним методом із

сукупними витратами 2996 дол.: фіксований розмір партії за умови вираженої сезонності попиту спричиняє накопичення наднормативних запасів у низький сезон і відповідне зростання витрат на зберігання. Це наочно ілюструє обмеження економічного розміру замовлення - припущення про рівномірність попиту, яке не виконується для сезонного виробництва.

Найкращий результат забезпечують динамічні методи - найменших сукупних витрат та найменших питомих витрат: за однакової кількості замовлень обидва методи дають сукупні витрати 2168 дол., що на 9,7 % нижче за результат методу «партія до партії» та на 27,6 % нижче за результат економічного розміру замовлення. Збіжність результатів методів LTC та LUC за наведеними даними пояснюється тим, що обидва методи формують партії шляхом об'єднання потреб суміжних періодів і за помірної варіації витрат приводять до однакового графіка замовлень. Економічний зміст отриманого результату полягає в тому, що врахування часової нерівномірності попиту під час планування потреби в матеріалах є реальним резервом зниження операційних витрат, який для розглянутого підприємства становить 27,6 % порівняно з найменш вдалим вибором методу.

Проведені розрахунки засвідчують, що методи операційного менеджменту є дієвим інструментом виявлення внутрішніх резервів підвищення економічної ефективності МСПП. Виявлені резерви мають кілька вимірів.

- *Зниження операційних витрат.* Обґрунтований вибір методу планування потреби в матеріалах забезпечує скорочення сукупних витрат на замовлення та зберігання. Для розглянутого підприємства перехід від економічного розміру замовлення до динамічних методів дає економію близько 828 дол. за шість місяців за незмінних обсягів виробництва.
- *Вивільнення обігових коштів.* Зниження рівня наднормативних запасів зменшує обсяг заморожених у запасах коштів. Для малих і середніх підприємств, для яких доступ до зовнішнього фінансування є обмеженим, вивільнення обігових коштів є істотним чинником фінансової стійкості.

- *Підвищення обґрунтованості планових рішень.* Прогнозування попиту з урахуванням тренду та сезонності підвищує точність виробничого планування, знижує ризик дефіциту продукції у піковий сезон та ризик надвиробництва у низький сезон.
- *Адаптивність до сезонних коливань.* Динамічні методи планування, на відміну від методу фіксованого розміру замовлення, враховують нерівномірність попиту, що особливо важливо для підприємств, орієнтованих на сезонні галузі-споживачі - будівництво та машинобудування.

Водночас отримані результати мають низку обмежень, які доцільно враховувати під час їх практичного використання. Розрахунки виконано на фактичних даних реального підприємства алюмінієвої галузі за фіксованих значень вартості замовлення та зберігання; зміна цих параметрів може змінити співвідношення ефективності методів. Прогноз попиту побудовано на даних одного річного циклу, що обмежує точність оцінки сезонних індексів. Не враховано обмежень виробничої потужності, мінімальних партій постачання та можливих знижок за обсяг закупівлі. Урахування цих чинників, а також розширення аналізу за рахунок інших методів операційного менеджменту визначено як напрям подальших досліджень.

Отримані результати узгоджуються з концептуальними положеннями розділу 1. Підтверджено, що економічна ефективність МСПП формується насамперед на мікрорівні та є керованою величиною: обґрунтований вибір операційних методів безпосередньо впливає на собівартість продукції та фінансовий стан підприємства. Кількісно підтверджено сформоване у підрозділі 1.2 положення про те, що економічна ефективність є внутрішнім, керованим чинником сталого розвитку, а не його зовнішнім наслідком.

Таким чином, методи операційного менеджменту (прогнозування попиту та планування потреби в матеріалах) є дієвим інструментом оцінки та реалізації внутрішніх резервів підвищення економічної ефективності МСПП. Прогнозування

попиту з урахуванням тренду та сезонної компоненти забезпечує обґрунтовану інформаційну основу виробничого планування.

Порівняння чотирьох методів визначення розміру партії засвідчило, що за умов вираженої сезонності попиту динамічні методи - найменших сукупних витрат та найменших питомих витрат - забезпечують мінімальні сукупні витрати, тоді як метод економічного розміру замовлення, що спирається на припущення про рівномірність попиту, виявляється найменш ефективним. Для розглянутого підприємства обґрунтований вибір методу планування забезпечує зниження операційних витрат на 27,6 %. Отримані результати кількісно підтверджують, що економічна ефективність МСПП є керованою на мікрорівні величиною, та узгоджуються з концептуальними положеннями першого розділу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Роздільний таксономічний аналіз за економічним, екологічним і соціальним блоками за період 2019-2022 років засвідчив загальне зростання рівня сталого розвитку галузі за збереження суттєвої міжсферової неоднорідності. Економічний блок демонструє найвищі значення таксономічного показника та загалом висхідну динаміку (зростання з 0,177 до 0,501 за максимуму 0,593 у 2021 році), тоді як екологічний блок має найнижчі значення та найповільніше зростання (з 0,083 до 0,350). Інтегральний показник наведено лише як допоміжну узагальнювальну характеристику, оскільки змістовні управлінські висновки забезпечує саме роздільний аналіз блоків. Отримані результати емпірично підтверджують сформоване у розділі 1 положення про екологічну (насамперед емісійну) складову як найбільш проблемний вимір сталого розвитку галузі та обґрунтований пріоритет декарбонізації, а також трактування економічної ефективності як внутрішнього чинника, а не наслідку сталого розвитку.

Прогнозування динаміки викидів CO₂ виконано із застосуванням моделі ARIMA(2, 1, 2) на часовому ряді галузевих викидів за 2005-2023 роки. З огляду на обмежений обсяг вибірки, статистичну незначущість окремих коефіцієнтів та гетероскедастичність залишків результати моделювання трактуються диференційовано за горизонтом прогнозування: прогноз до 2030 року розглядається як надійна оцінка інерційної динаміки, тоді як прогноз до 2050 року має статус ілюстративного інерційного сценарію. Цей сценарій засвідчує стабілізацію сукупних викидів без їх суттєвого абсолютного скорочення, що не відповідає цілям нетто-нульових викидів та обґрунтовує необхідність випереджального впровадження заходів декарбонізації.

Оцінювання мікрорівневих резервів методами операційного менеджменту (планування потреби в ресурсах та управління запасами) підтвердило наявність внутрішніх резервів зниження витрат і питомого енергоспоживання на рівні окремого підприємства. Цей аналіз слугує містком між галузевим рівнем (таксономічне оцінювання та прогнозування) і мікрорівневим інструментарієм підтримки управлінських рішень, поглибленим у розділі 3.

Зіставлення результатів таксономічного аналізу зі сформованою у розділі 1 системою критеріїв засвідчило їх узгодженість: найнижчі значення екологічного блоку відповідають центральному місцю емісійних показників у системі критеріїв, а стабільне зростання економічного блоку узгоджується з трактуванням економічної ефективності як внутрішнього чинника сталого розвитку.

Сукупно проведений у розділі аналіз сформував емпіричне підґрунтя для розроблення у розділі 3 науково-методичного інструментарію забезпечення економічної ефективності МСПП алюмінієвої галузі на засадах сталого розвитку - від інтегрального оцінювання та ранжування альтернатив управлінських рішень до моделювання енергоефективності, декарбонізації й операційних процесів.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МАЛИХ І СЕРЕДНІХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ АЛЮМІНІЄВОЇ ГАЛУЗІ НА ЗАСАДАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

3.1. Удосконалення оцінювання економічної ефективності МСП з виробництва алюмінію для вибору альтернатив та пріоритетів розвитку підприємств

Сучасний етап розвитку глобальної економіки характеризується переходом до парадигми сталого розвитку, що вимагає глибокої трансформації промислового сектора. Алюмінієва галузь, одна з найенергоємніших та найемісійніших сфер виробництва, перебуває під значним тиском міжнародних кліматичних зобов'язань. Сучасні вимоги щодо декарбонізації, зниження вуглецевого сліду та забезпечення діяльності промислових виробництв на засадах сталого розвитку, формують нову конкурентну реальність. У цих умовах інтеграція принципів ESG стає не лише репутаційним інструментом, а й важливою умовою економічного розвитку та збереження доступу до міжнародних ринків збуту. Особливо важливим це є для виробництва критичних матеріалів у зв'язку з існуючими глобальними тенденціями у цій сфері. Для українських виробників така ситуація є суперечливою: з одного боку, безпрецедентні можливості розвитку конкурентних виробництв, а з іншого - вимушені реалізувати можливості такого розвитку в умовах високого економічного та геополітичного тиску, нестабільності, зумовленої війною. В таких умовах особливо актуалізується потреба у створенні та апробації власного підходу збалансування економічних стратегій розвитку та імплементації світових стандартів відповідальності промислових виробників, що може слугувати надійною основою досягнення стійких конкурентних позицій. Одним із найбільш поширених підходів у сучасній практиці менеджменту промислових підприємств є ESG-підхід.

Водночас, якщо великі транснаціональні корпорації, що займають значну частку ринку алюмінієвого виробництва, володіють достатніми фінансовими,

експертними та технологічними ресурсами для комплексної реалізації стратегій декарбонізації, то МСПП зіштовхуються з низкою специфічних бар'єрів. Головною проблемою згаданих підприємств є обмежені фінансові ресурси розвитку. У поєднанні з відсутністю дієвих інструментів пріоритизації управлінських рішень, що можуть забезпечити стійку конкурентоспроможність, це створює серйозні виклики економічного розвитку, а у світлі обговорюваних вимог щодо впровадження обов'язкового ESG-звітування, ще й можливі інституційні перешкоди діяльності на початкових етапах впровадження таких вимог. В таких умовах задля реалізації стратегій випереджаючого розвитку, що особливо важливо сьогодні в сфері виробництва критичних матеріалів в Україні, виникає необхідність створення сучасного, придатного для управління МСПП методичного інструментарію, який дозволив би в умовах обмежених бюджетів обирати ті рішення, що забезпечують максимальний баланс між екологічними вимогами, соціальними обмеженнями та управлінською, в тому числі економічною ефективністю.

Проблематика забезпечення сталого розвитку промислових підприємств на засадах ESG-критеріїв перебуває в центрі уваги сучасного академічного дискурсу. Аналіз наявних досліджень дозволяє виділити ключові напрями, що формують теоретико-методологічне підґрунтя даної роботи.

В більшості досліджень ESG розглядається з позиції виділення нефінансових метрик діяльності для оцінки їх впливу на фінансово-економічні результати компаній. Зокрема, науковцями доведено наявність позитивної кореляції між впровадженням принципів сталого розвитку та фінансовою успішністю у більшості досліджених кейсів [92]. У промисловості це супроводжується зниженням виробничих ризиків та вартості капіталу, хоча й відзначається наявність розбіжностей у методології агрегування ESG-рейтингів, що ускладнює їх об'єктивне використання у практиці [93]. Додатково, дослідження підкреслюють, що інтеграція ESG-принципів в управління підприємствами створює довгострокову вартість, проте вимагає значних початкових інвестицій, що є проблемою для невеликих компаній [94]. Щодо виробників алюмінію, то

важливість таких оцінок підтверджується специфікою забезпечення сталого розвитку саме алюмінієвої галузі, яка є однією з найбільш енерго- та вуглецевоємних. Для компенсації таких наслідків міжнародні асоціації виробників алюмінію намагаються враховувати цю специфіку у власних стратегіях та пріоритетах розвитку. Згідно з галузевими звітами Міжнародного інституту алюмінію [78] та дорожньою картою Європейської асоціації виробників алюмінію [95], ключовими векторами декарбонізації є перехід на відновлювані джерела енергії, підвищення енергоефективності плавильних процесів та збільшення частки вторинної переробки.

Окрема увага в науковій літературі приділяється особливостям імплементації ESG-практик в діяльність МСПП. У низці досліджень відзначається, що МСПП можуть зіштовхуватися зі специфічними бар'єрами: обмеженістю фінансових ресурсів та дефіцитом кваліфікованого персоналу. Дискусійною залишається теза про відсутність ефекту масштабу при впровадженні екологічних інновацій: для частини МСПП, орієнтованих на нішеві ринки та гнучкі циркулярні рішення, екологічні інновації можуть, навпаки, ставати джерелом конкурентних переваг навіть за відсутності великих обсягів виробництва. Як наслідок, малий бізнес часто сприймає ESG-звітність не як інструмент стратегічного управління, а як обтяжливий чинник регуляторного тиску [96, 97]. У вирішенні цього протиріччя доцільно скористатися наявним методичним інструментарієм прийняття управлінських рішень за умов конфлікту цілей, наприклад максимізації прибутку проти мінімізації викидів. Зокрема, перевіреними є методи багатокритеріального аналізу, що дозволяють порівнювати альтернативи за набором різнорозмірних критеріїв і розвинені сьогодні до рівня комплексних інтегральних оцінок [98, 99].

Загалом, для наукових праць, що стосуються прикладних аспектів впровадження ESG в економічну практику, характерною є певна методологічна дискусійність, викликана еволюцією використання ESG-практик. Так, маючи виражену «нефінансову» спрямованість, методики оцінювання застосування ESG можуть мати самостійне застосування - для оцінки відповідальності підприємств. В такому випадку числові оцінки рівня застосування ESG-практик знаходять

відображення у вигляді ESG-score. Це характерно для праць, в яких економічна ефективність розглядається як частина або продовження компонента "G" (Governance), а самі економічні показники не вносять окремо до складу метрик ESG, а аналізуються як наслідки - як ESG впливає на фінансові показники та використання ресурсів. Такі підходи для аналізу застосування ESG промисловими підприємствами характерні, наприклад, для оцінки зв'язків ESG з фінансовими показниками та використанням ресурсів [100]. Схожі зв'язки, які розкривають непрямий вплив розкриття нефінансової інформації в ESG-звітах (зокрема у G-компоненті) на забезпечення стійкого економічного зростання компаній та як наслідок - економіки країни, характерні і для праць макrorівневого спрямування [101].

Роботи, в яких підкреслюється виняткове значення саме економічної компоненти для галузей, які створюють велике екологічне навантаження, пропонується використання такого компонента окремо. В цьому контексті розвинені підходи, де індекс ESG розуміють як загальну характеристику якості корпоративного управління, а її часткові складові розкриваються через економічні, соціальні екологічні компоненти [102]. Тобто, в цьому випадку управлінські аспекти, що початково мали розглядатись разом з іншими напрямками відповідальних дій підприємства, фактично стають узагальненим вираженням якості реалізації інших компонентів, серед яких економічна виділяється як самостійний напрям і блок показників. При тому ж розумінні особливості економічної ефективності у системі корпоративного управління, інші автори заперечують включення економічних компонентів до ESG-звітності та регуляторних дій у цьому напрямку і прямо наголошують, що ESG варто розглядати саме у нефінансовому контексті, а фінансову успішність (економічний компонент в інших працях) - як зовнішній результат або окремий фактор впливу, а не частину внутрішнього «G» у системі корпоративного управління, орієнтованого на дотримання ESG-сталості [103]. Така ж позиція характерна і для інших дослідників [104].

Отже, попри створену ґрунтовну теоретичну базу, на сьогодні існує, по-перше, дискусійність щодо того, чи варто вважати економічну ефективність частиною ESG-зусиль підприємства чи все-таки їх наслідком, а, по-друге, виражена прогалина між глобальними і національними вимогами сталого розвитку та мікрорівневим інструментарієм їх реалізації, особливо для малого бізнесу. У сфері виробництва критичних матеріалів цей розрив особливо відчутний. Більшість існуючих ESG-моделей та рейтингових систем орієнтовані на великі корпорації з розгалуженими системами комплаєнсу. У працях, в яких обґрунтовано доцільність включення економічних показників оцінювання ефективності ESG-практик, такі показники є переважно фінансовими (рентабельність, окупність інвестицій, інше), що не відображає особливості економіки галузі. В алюмінієвому виробництві основними економічними проблемами, пов'язаними з векторами ESG-сталості (що попри певні відмінності, завжди включають екологічну складову), є висока енергоємність та проблема вуглецевого сліду, що створює не лише екологічне, але й економічне навантаження та непрямі економічні втрати, зокрема, через репутаційні наслідки. Водночас просторово-часові диспропорції у формуванні пропозиції алюмінію, зумовлені нерівномірністю ресурсного забезпечення та технологічного розвитку, посилюють виклики забезпечення сталості галузі на національному та регіональному рівнях [106]. Як наслідок, на рівні МСПП алюмінієвої галузі, фактично відсутній адаптований, науково обґрунтований інструментарій, який би враховував фінансові обмеження і дозволяв би пріоритизувати управлінські рішення на засадах сталого розвитку. Наявні моделі багатокритеріального аналізу не враховують галузеву специфіку металургії, зокрема необхідність окупності в умовах високої волатильності цін на енергоносії з одночасним дотриманням вимог екологічної, соціальної сталості та якості управління з орієнтацією на довгострокові пріоритети.

Враховуючи, що наукоємність металургійного виробництва в Україні характеризується середньонизьким рівнем і становить лише 16,6 % [107], це вказує на недостатню інноваційну інтенсивність галузі та актуалізує потребу у розробленні більш глибоких науково-методичних рішень щодо її розвитку. З

іншого боку, у контексті ESG країни, що розвиваються, за рахунок дефіциту ресурсів часто демонструють вищий рівень циркулярності виробництва як прояв екологічної складової, однак такі практики залишаються фрагментарними та інституційно не забезпеченими. Це актуалізує необхідність їх трансформації у системні ESG-орієнтовані підходи, які концептуально ґрунтуються на ідеях Дж. Елкінгтона [6], що поєднують ресурсоефективність із довгостроковою економічною результативністю [6].

З метою обґрунтування можливостей забезпечення сталого розвитку підприємств алюмінієвої галузі, які функціонують у секторі критичних матеріалів в умовах сучасних економічних та геополітичних викликів, доцільним є проведення порівняльного аналізу існуючих наукових підходів щодо їх потенційної адаптації та імплементації у вітчизняну практику, табл. 3.1. Доцільність включення до порівняльного аналізу галузевих стандартів, зокрема «Стандарт ефективності ініціативи з управління алюмінієм», зумовлена його здатністю формалізувати ESG-вимоги на рівні виробничих процесів і ланцюгів постачання, що дозволяє оцінити практичну імплементацію принципів сталого розвитку в алюмінієвій промисловості [108].

Таблиця 3.1

Порівняльний аналіз характеристик підходів забезпечення сталого розвитку промислових підприємств

Характеристика	Підхід				
Характеристика	Дейнеко, Кушніренко [109]	Концепція «Індустрія 4.0» [6]	ASI Стандарт [110]	Лоу Цз., Лей М., Ван С. [107]	Авторський підхід
Галузева специфіка (алюміній)	Частково (чорна металургія)	Так (універсальна)	Так (алюміній)	Так (первинний та вторинний)	Так
Орієнтація на МСПП	Ні (великі підприємства)	Частково	Ні (великі виробники)	Ні	Так
Інтеграція E + S + G	Частково (E + G)	Так - але з обмеженнями через ресурси	Так	Ні (лише E)	Так
Зв'язок з економічною ефективністю	Частково	Частково - залежить від інвестицій та окупності.	Опосередковано	Ні	Так (KPI, моделювання)

Характеристика	Підхід				
	Ні	Ні	Частково	Так	Так
Контекст критичних матеріалів					
Поетапність впровадження	Ні	Ні	Ні	Ні	Так

Джерело: складено автором на основі [106, 6, 108, 109]

Результати порівняльного аналізу табл. 3.1 свідчать, що наявні підходи мають низку переваг, проте жоден з них не забезпечує комплексного охоплення основних аспектів: галузевої специфіки алюмінієвого виробництва; масштабних і ресурсних обмежень МСПП; повноцінної інтеграції екологічної, соціальної та управлінської складових із економічною ефективністю; а також контексту виробництва критичних матеріалів.

Виявлена наукова прогалина зумовлює необхідність розроблення простого, але доказового механізму, здатного збалансувати економічні інтереси підприємства з екологічними та соціальними імперативами. Такі можливості відкриваються, якщо економічний компонент ESG-орієнтованого управління розвитком промисловими підприємствами розглядати як внутрішній компонент, що невіддільно пов'язаний з можливостями забезпечення розвитку за іншими напрямками. У зв'язку з цим необхідно вийти з позиції, що економічний компонент є важливою внутрішньою складовою ESG-сталості, але його виняткова важливість та специфіка промислових підприємств, де економічні фактори не зводяться лише до традиційних узагальнених показників рентабельності та окупності, вимагає врахування цього напрямку окремо від блоку G.

Наступна об'єднана система цілей забезпечує баланс між економічною ефективністю та традиційними ESG-напрямами, при цьому акцентуючи увагу на критичності алюмінієвої галузі. У цій системі економічний аспект виділено в окремий «Econ»-блок, що доповнює екологічну, соціальну та управлінську складові [122, 123]. Такий підхід враховує специфіку енергоємного виробництва алюмінію - зростання попиту на критичні ресурси, зокрема алюміній, в умовах суворих кліматичних норм. Наприклад, відзначено, що альянс провідних світових виробників активізує перехід на вторинну сировину та відновлювані джерела енергії для досягнення вуглецевої нейтральності [123]. Узагальнено стратегічні цілі

для малих і середніх підприємств, що займаються виробництвом алюмінію, подано на рис. 3.1.

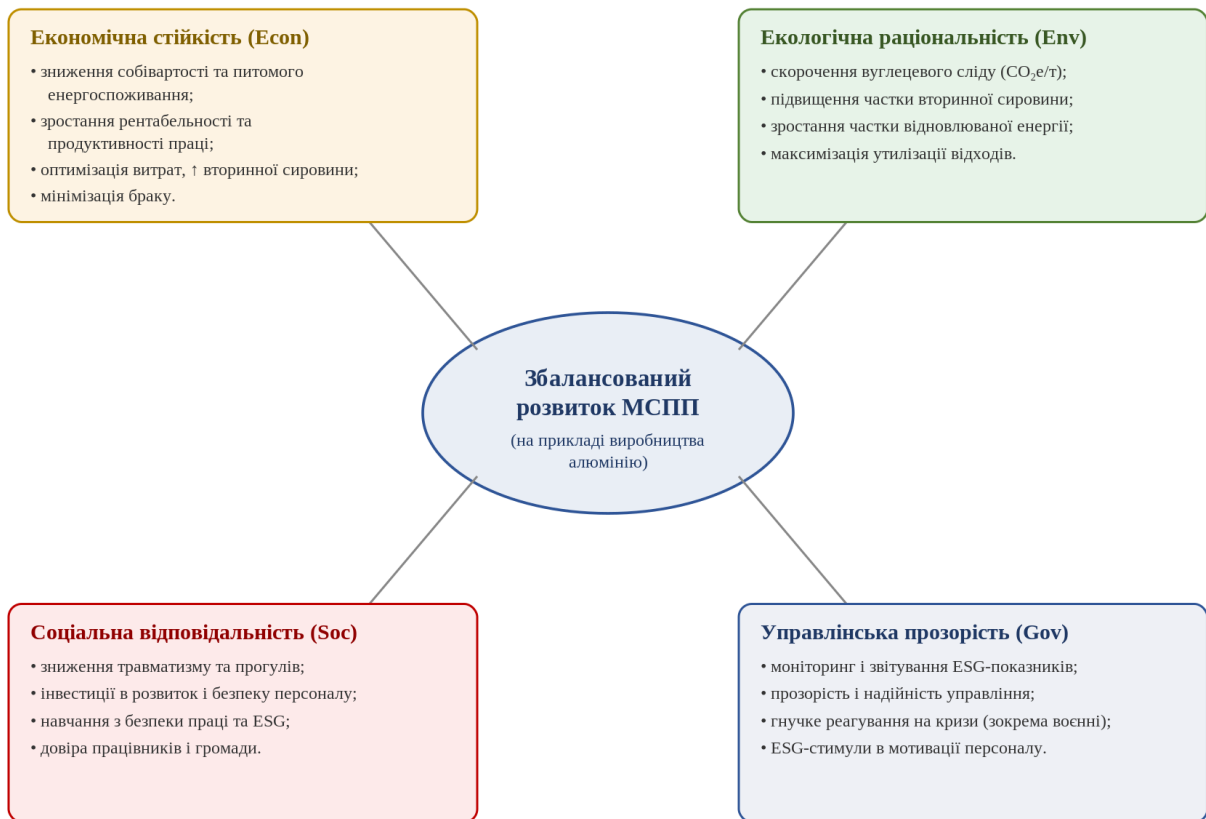


Рис. 3.1. Баланс стратегічних цілей МСПП у системі координат ESG та економічної сталості

Джерело: розроблено автором

Цей підхід об'єднує економічні та ESG-орієнтовані цілі: з одного боку, спрямовуючи підприємство на зростання ефективності і конкурентоспроможності; з іншого - відповідаючи на виклики сталого розвитку та жорсткі екологічні регламенти, що особливо актуально для виробників критичних матеріалів, як-от алюмінію. Водночас акцент зроблено на «динамічному управлінні», коли цифрові системи контролю та внутрішні механізми стимулювання ESG-показників дають можливість оперативно коригувати процеси. Навіть під час криз - енергетичних чи воєнних - функціонування лишається відкритим для огляду. Така інтегрованість відповідає світовим тенденціям: металургійна галузь поступово впроваджує

додаткову звітність і сертифікацію, аби відповідати новим ESG-вимогам і зробити виробництво «більш стійким» [122, 123].

Таким чином, запропонована схема реалізує наукову новизну розділу - комбінацію економічної ефективності з принципами ESG для критично важливої галузі. Це забезпечує збалансування прибутковості та сталості: економічна частина розглядається як внутрішній рушій, що підтримує екологічні й соціальні ініціативи підприємства [122, 123]. Водночас такий підхід сприяє розробці мікрорівневих управлінських рішень (мультикритеріальних моделей), котрі дозволяють малим і середнім виробникам алюмінію розставляти пріоритети між прибутком, низьким вуглецевим слідом та соціальною відповідальністю.

Водночас система управління повинна спиратися на конкретні критерії, особливо коли треба приймати рішення в короткостроковий чи середньостроковий терміни. Тому було створено набір принципів, що допомагають діяти ефективно в економічному сенсі. Ці правила показують, як вирішувати питання так, щоб не порушувати баланс між фінансовою стабільністю, турботою про навколишнє середовище, обов'язками перед суспільством і відкритістю процесів. Кожне з таких положень потім інтегрується в основу вибору конкретних кроків для «зеленої» перебудови підприємства. Тому що саме вони дають можливість враховувати ESG-чинники під час планування, перевірки ходу справ і аналізу того, наскільки все працює.

У таблиці 3.2 подано набір принципів, що задають основний напрям для управлінських рішень у системі підвищення ефективності МСПП з огляду на ESG-чинники. Ще до того, як скористатися цими принципами в реальних умовах, слід точніше опрацювати підхід до порівняння можливих шляхів розвитку.

**Принципи механізму забезпечення економічної ефективності МСПП на засадах
ESG-E-підходу**

Принцип	Зміст	Зв'язок з ESG	Особливості імплементації в МСПП
Економічна доцільність	Кожне управлінське рішення про «зелену» трансформацію повинно оцінюватися за впливом на собівартість, маржинальність та окупність. Екологічні заходи повинні бути економічно обґрунтованими..	Е + Econ	Пріоритет швидкоокупним заходам: енергоефективність, утилізація тепла, оптимізація режимів плавки.
Еко-ефективність	Мінімізація витрат ресурсів: енергії, сировини, води; емісія на одиницю продукції; орієнтація на показники «ресурсоемність/т» та «CO ₂ e/т».	Е	впровадження базових систем обліку ресурсоспоживання: електроенергія по основних споживачах, газ/паливо, вихід придатного
Циркулярність	Максимізація частки вторинної сировини у шихті, рециклінг шлаків, дросів і стружки; побудова замкнутих ресурсних контурів.	Е	Затвердження технологічних карт сортування та підготовки брухту, контроль домішок, мінімізація засмічень
Технологічна здійсненність для МСПП	Пропоновані рішення повинні відповідати розмірам, фінансовим можливостям і ресурсам малих та середніх підприємств. Пріоритетними повинні бути заходи з невеликими капіталовкладеннями і швидкою окупністю.	Е + G	Мінімізація технологічних ризиків браку, поганої якості
Соціальна відповідальність	Безпека праці, розвиток компетенцій персоналу, етичні практики в ланцюзі постачання.	S	Короткострокові програми підвищення кваліфікації під конкретні операції та ризики
Корпоративне управління і прозорість даних	Регулярний збір, верифікація та розкриття ESG-показників; антикорупційний комплаєнс; залучення стейкхолдерів.	G	Спрощений ESG-дешборд: 15 - 20 ключових показників замість громіздкої звітності.
Інтегрованість прийняття рішень	Управлінські рішення приймаються на основі інтегрального оцінювання, а не лише за фінансовими критеріями, що забезпечує баланс економічних, екологічних і соціальних результатів.	Econ + E + S + G	Застосування спрощених методів інтегрального оцінювання від 0 до 5

Джерело: складено автором.

Для вирішення проблеми пріоритизації альтернатив розвитку МСПП алюмінієвої галузі важливим є уточнення складових та базових принципів, що покладатимуться в основу інтегрального оцінювання варіантів рішень на засадах ESG-Е-підходу. При цьому на підставі аналізу існуючих праць та специфіки алюмінієвих виробництв, доцільним є включення економічної складової до складу компонентів оцінювання ESG-сталості підприємств. Уточнення базових принципів підходу, що слугуватиме основою вибору часткових показників та визначення організаційних процедур його застосування, наведено в табл.3.3.

Таблиця 3.3

Базові принципи підходу до інтегрального оцінювання альтернатив розвитку
МСПП

Принцип	Мета та особливості застосування в оцінювання альтернатив
Інтегрованість економічних цілей та екологічної сталості	Подолання протиріч між цілями забезпечення прибутковості та декарбонізації
Доказовість управлінських рішень	Прозорість та об'єктивність оцінювання: використання кількісних метрик та верифікованих даних
Відповідність Цілям сталого розвитку	Фокус на інноваціях та інфраструктурі, відповідальному споживанні, боротьбі зі зміною клімату
Масштабованість та адаптивність	Можливість налаштування методичних засад оцінювання під специфіку конкретного МСПП без залучення складного корпоративного інструментарію

Джерело: складено автором.

Для розробки інтегрального показника, який би дозволяв поєднати принципи, наведені в табл. 3.3, необхідно конкретизувати критерії оцінювання. В роботах, що стосуються застосування ESG, спільною рисою є узгодженість щодо екологічного та соціального вимірів. Водночас, як було зазначено, певною неузгодженістю характеризується тлумачення виміру «Governance». З одного боку, ESG як трикомпонентна концепція та управлінська практика, включає економічні складові управління. З іншого боку, для промислових підприємств, особливо критичних матеріалів (в тому числі і алюмінієвої промисловості, на прикладі якої здійснено це дослідження) економічна складова сталості є винятково важливою. Це зумовлено високою енергоємністю виробництва, використанням вторинної

сировини, що змінює не лише рівень викидів, але й структуру економічних витрат. Це обумовлює необхідність операціоналізації економічної компоненти у вигляді окремого блоку в інтегральному оцінюванні сталого розвитку МСПП [110], зокрема так, як це наведено в табл.3.4.

Таблиця 3.4

Критерії та складові оцінювання альтернатив розвитку МСПП алюмінієвої галузі на засадах ESG-E-підходу

Критерій	Умове позначення	Можливі складові оцінювання
Екологічна стійкість	Env	- Зниження емісії CO ₂ - Енергоефективність виробництва - Оцінка життєвого циклу
Соціальна відповідальність	Soc	- Охорона праці та безпека - Збереження та створення робочих місць - Програми навчання персоналу
Управлінська ефективність	Gov	- Прозорість бізнес-процесів - Якість ESG-звітності - Цифровізація управління даними
Економічна ефективність	Econ	- Окупність інвестицій - Вплив на показники рентабельності - Оптимізація собівартості продукції

Джерело: складено автором.

Запропонований підхід є пропозицією, що пропонується для наукової дискусії та потребуватиме уточнення складових оцінювання з урахуванням специфіки виробничих процесів та стратегічних цілей розвитку МСПП. Але його важливою особливістю є врахування вагомості економічних мотивів діяльності підприємств, що за рахунок окремого врахування такої складової, дає змогу враховувати її окремим напрямом у розрахунках з присвоєнням відповідного вагового коефіцієнта. При цьому, такий підхід відповідає логіці ESG-управління, де ефективність підприємства розглядається як результат збалансованого розвитку, з дотриманням всіх ключових вимірів сталості та врахування важливості економічної ефективності, що є передумовою випереджаючого розвитку промислових підприємств в умовах кризи.

Для МСПП алюмінієвої галузі необхідність інтегрованого підходу є особливою. Практична реалізація заходів модернізації та декарбонізації, зокрема

підвищення енергоефективності плавильних процесів, збільшення частки вторинної сировини, впровадження систем очищення викидів, розвиток систем управління даними, заходи з охорони праці тощо, пов'язана з обмеженими фінансовими ресурсами та необхідністю швидкого прийняття управлінських рішень. У таких умовах підприємству потрібен простий і водночас аналітично обґрунтований інструмент, що дозволяє визначати пріоритетність управлінських рішень щодо розвитку підприємства.

З метою прийняття рішень з урахуванням запропонованих критеріїв та складових, пропонується використання інтегрального показника оцінювання альтернатив, що ґрунтуючись на ESG-принципі, дозволяє посилити врахування економічних засад забезпечення ефективності діяльності МСПП. Інтегральний показник, (далі - IESG-E, тобто Integrated ESG-Economic Index), розраховується як зважена сума нормалізованих критеріїв, що відображають економічні, екологічні, соціальні та управлінські аспекти. На відміну від існуючих підходів до оцінки ESG, запропонований індекс спеціально адаптований для малих та середніх промислових підприємств і включає специфічні для сектору вагові коефіцієнти, що відображають економічні обмеження та пріоритети декарбонізації алюмінієвої промисловості.

Для забезпечення зіставності результатів оцінювання пропонується використовувати бальну шкалу в межах від 0 до 5 балів, де 0 відповідає відсутності позитивного ефекту або негативному впливу оцінюваного рішення, а 5 - максимально позитивному ефекту за оцінюваним частковим показником.

Інтеграція визначених у табл.3.4 критеріїв (а в їх межах - часткових факторів) у єдиний індикатор здійснюється за допомогою вагових коефіцієнтів, які відображають відносну значущість кожної складової серед об'єктів оцінювання.

Інтегральний показник альтернатив управлінських рішень визначається за формулою середньої арифметичної зваженої оцінок за відповідними критеріями:

$$IESG-E = \alpha_1 \cdot Econ + \alpha_2 \cdot Env + \alpha_3 \cdot Soc + \alpha_4 \cdot Gov, \quad (3.1)$$

де *Econ*, *Env*, *Soc*, *Gov* - відповідно економічні, екологічні, соціальні та управлінські складові (блоки оцінюваних часткових показників);

α_1 - α_4 (α_i) - вагові коефіцієнти для відповідного блоку показників, $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$ за умови $\alpha_i > 0$.

Склад часткових показників, згрупованих за блоками Econ, Env, Soc та Gov і поданих у табл.3.5, у вигляді системи цільових KPI, обґрунтовано за результатами експертного опитування представників підприємств алюмінієвої галузі.

Таблиця 3.5

Склад і структура часткових показників (KPI) для оцінювання альтернатив управлінських рішень на засадах ESG-E-підходу

Група	Показник	Одиниця
Економіка	Собівартість продукції	грн/т, USD/т
	Операційна рентабельність	%
	Продуктивність праці	т/ос., грн/ос.
	Частка енерговитрат у структурі собівартості	%
	Підвищення ефективності використання вторинної сировини	%
	Питоме енергоспоживання	кВт·год/т
Екологія	Рівень циркулярності використання матеріалів	%
	Питоме енергоспоживання з відновлюваних джерел	%
	Вуглецевий слід (Score 1+2)	тCO ₂ e/т
	Частка вторинного Al у шихті	%
	Коефіцієнт утилізації відходів / шлаків	%
Соціальна сфера	Частота виробничого травматизму (LTIFR)	Випадків /1 млн год
	Інвестиції у розвиток та безпеку персоналу	тис. грн/працівника
	Рівень прогулів та невиходів на роботу	% робочого часу
	Частка персоналу, що проходить регулярне навчання з безпеки та ESG	%
Управлінська сфера	Рівень надійності ланцюга постачання	% верифікованих постачальників
	Рівень верифікації ESG-даних	% показників, підтверджених внутрішнім аудитом
	Рівень цифровізації процесів управління виробництвом	% процесів у ERP/MES
	Частка процесів із застосуванням штучного інтелекту та цифрових двійників	%
	Частка працівників, охоплених ESG-стимулюванням (вихід в нічну зміну, за умов коли атомна енергетика продукує надлишок дешевої і чистої енергії)	%
Інтегральний	Інтегральний індекс ефективності IESG-E	0...1

Джерело: складено автором.

Враховуючи специфіку функціонування МСПП алюмінієвої галузі, де ключове значення мають економічна результативність і швидка окупність

інвестицій для подальшого розвитку, в тому числі реалізації заходів ESG-сталості, важливо уточнити вагу кожної складової, зокрема і економічної, в реалізації наведеного методичного підходу, а пізніше - уточнити склад часткових показників та відповідно їх вагові коефіцієнти.

На першому етапі апробації запропонованого підходу визначення ваг кожної складової формули (3.1) (без деталізації часткових показників на першому етапі аналізу), здійснено із застосування методу експертних оцінок. Для цього проведені особисті інтерв'ю представників алюмінієвих виробництв як в Україні (загалом - 7 експертів з досвідом роботи в галузі). До складу експертної групи увійшли керівники, головні інженери та енергоменеджери підприємств зі стажем у галузі не менше п'яти років, які надали оцінки вагомості відповідних критеріїв для визначення пріоритету альтернатив управлінських рішень, в прийнятті яких доцільно застосовувати ESG-підхід. Анкета та зведені результати наведені в Додатку Б.

В результаті отримані такі вагові коефіцієнти: $\alpha_1 = 0,40$ - економічний критерій; $\alpha_2 = 0,30$ - екологічний; $\alpha_3 = 0,15$ - соціальний; $\alpha_4 = 0,15$ - управлінський.

З урахуванням зазначених ваг формула інтегрального індексу в даному випадку набуває вигляду:

$$IESG-E = 0,40 \cdot Econ + 0,30 \cdot Env + 0,15 \cdot Soc + 0,15 \cdot Gov \quad (3.2)$$

Узгодженість експертних оцінок перевірено за коефіцієнтом конкордації Кендалла, який становив $W = 0,78$ за статистично значущого χ^2 -критерію ($p < 0,05$), що свідчить про високий ступінь погодженості думок експертів і прийнятну надійність отриманих вагових коефіцієнтів.

Для перевірки стійкості результатів ранжування проведено аналіз чутливості: кожен ваговий коефіцієнт почергово відхиляли в межах $\pm 10-20\%$ із пропорційним перенормуванням решти ваг. У всіх сценаріях відносний порядок пріоритетних альтернатив зберігався, а зміни торкалися лише суміжних позицій із близькими значеннями IESG-E, що підтверджує робастність запропонованого підходу до помірних коливань експертних оцінок.

Щодо обсягу експертної групи, то достатність сформованої вибірки із 7 фахівців підтверджується статистичною значущістю коефіцієнта конкордації Кендалла ($W = 0,78$; χ^2 -критерій значущий за $p < 0,05$): узгодженість оцінок такого рівня є статистично надійною і не виникає випадково. Орієнтовну мінімально необхідну кількість експертів оцінено за відомим співвідношенням $N_{\min} = 0,5 \cdot (3/b + 5)$, де b - припустима відносна похибка групової оцінки; за помірною рівня $b = 0,30-0,33$ отримуємо $N_{\min} = 7$, що відповідає чисельності залученої групи. Водночас обмежений обсяг панелі усвідомлено як чинник, що знижує репрезентативність, тому отримані ваги розглядаються як попередні (орієнтовні), а їх стійкість додатково підтверджено аналізом чутливості ($\pm 10-20\%$); розширення експертної панелі та залучення міжнародних фахівців визначено як напрям подальших досліджень.

Звичайно, практичне застосування запропонованого підходу на рівні галузі, особливо у випадку застосування методичного підходу для визначення найбільш конкурентоспроможного партнера за таким принципом (наприклад, для участі в програмах та ініціативах публічно-приватного партнерства, тощо), вагові коефіцієнти, як і конкретизація часткових складових за кожним критерієм потребує ширшого експертного обговорення. В даній роботі такий підхід пропонується як методична основа, що може удосконалюватись залежно від цілей, можливостей та обмежень. При цьому важливим є те, що принцип інтегрованості зазначених у формулі (3.1) компонент та їх використання для прийняття рішень реалізується через формалізований механізм багатокритеріального оцінювання. Це не лише забезпечує баланс між економічною ефективністю, екологічною відповідальністю, соціальними аспектами діяльності та якістю управління, але й створює об'єктивні прозорі засади оцінювання процесів та результатів. В такий спосіб можливою буде не лише підтримка справедливої конкуренції без необґрунтованих преференцій певним МСПП.

Набагато важливішим прикладним результатом є створення методичного інструментарію постійного власного аудиту відповідних процесів підприємствами,

а отже і визначення прогалін у забезпеченні сталого розвитку та розуміння можливостей реагування на виявлені упущення.

Практична реалізація запропонованого підходу на етапі визначення часткових оцінок для їх подальшого агрегування вимагає застосування стандартних процедур нормалізації та застосування основ розв'язання задач багатокритеріального прийняття рішень.

Отримані значення інтегрованого зваженого індексу IESG-E дозволяють перейти до наступного етапу - порівняння та впорядкування альтернативних ініціатив. На основі розрахованих значень індексу здійснюється ранжування альтернатив за рівнем їхнього впливу на сталий розвиток підприємства.

Усі ініціативи варто ранжувати у порядку спадання значень IESG-E. Отриманий рейтинг можна використовувати для формування портфелю заходів сталого розвитку для удосконалення діяльності підприємства. При цьому для інтерпретації значень індексу можна використовувати таку шкалу (табл.3.6).

Таблиця 3.6

Шкала значень IESG-E для визначення пріоритетності альтернативи

Значення індексу	Інтерпретація
$IESG-E \geq 0,75$	Високий пріоритет
$0,50 \leq IESG-E < 0,75$	Середній пріоритет
$0,25 \leq IESG-E < 0,50$	Низький пріоритет
$IESG-E < 0,25$	Впровадження недоцільне

Джерело: складено автором.

Вибір саме такої шкали зумовлений властивостями інтегрального індексу IESG-E. Оскільки індекс розраховується як зважена сума нормалізованих часткових критеріїв, ваги яких у сумі дорівнюють одиниці, його значення за побудовою належать діапазону $[0; 1]$. Це уможливорює застосування фіксованих абсолютних порогів, незалежних від конкретної вибірки підприємств чи періоду оцінювання, і забезпечує зіставність результатів у динаміці та між об'єктами. За відсутності достатнього емпіричного масиву для застосування статистичних методів класифікації (природних меж Дженкса, відхилень від середнього тощо), які

потребують великих репрезентативних вибірок, для МСПП з обмеженим обсягом даних обрано рівноінтервальний поділ діапазону $[0; 1]$ на чотири класи з однаковим діапазоном 0,25, що відповідають квартилям шкали значень. Такий поділ є найбільш прозорим і відтворюваним, а його результати не залежать від випадкових коливань вибірки.

Кількість градацій (чотири) узгоджено з чотириблоковою структурою індексу (економічний, екологічний, соціальний та управлінський виміри) і з логікою управлінського рішення «впроваджувати — відкласти — відхилити», що забезпечує водночас достатню розрізнявальну здатність і стійкість оцінки. Верхня межа 0,75 (верхній квартиль шкали) відповідає переважанню високих нормалізованих оцінок за більшістю складових і кваліфікує альтернативу як високопріоритетну; натомість значення нижче 0,25 свідчить, що навіть з урахуванням вагових коефіцієнтів альтернатива не задовольняє більшості критеріїв, а тому її впровадження визнається недоцільним. За логікою побудови запропонована шкала узгоджується з усталеними підходами до інтерпретації нормалізованих показників, зокрема з функцією бажаності Харрінгтона та шкалами таксономічного аналізу сталого розвитку, у яких діапазон $[0; 1]$ поділяється на рівні якісні рівні.

Для практичного використання запропонованого підходу із формалізацією у вигляді матриці оцінок альтернатив доцільно представити послідовність дій, що відображає основні етапи розрахунку інтегрального індексу та процедуру пріоритизації ініціатив (рис. 3.2).

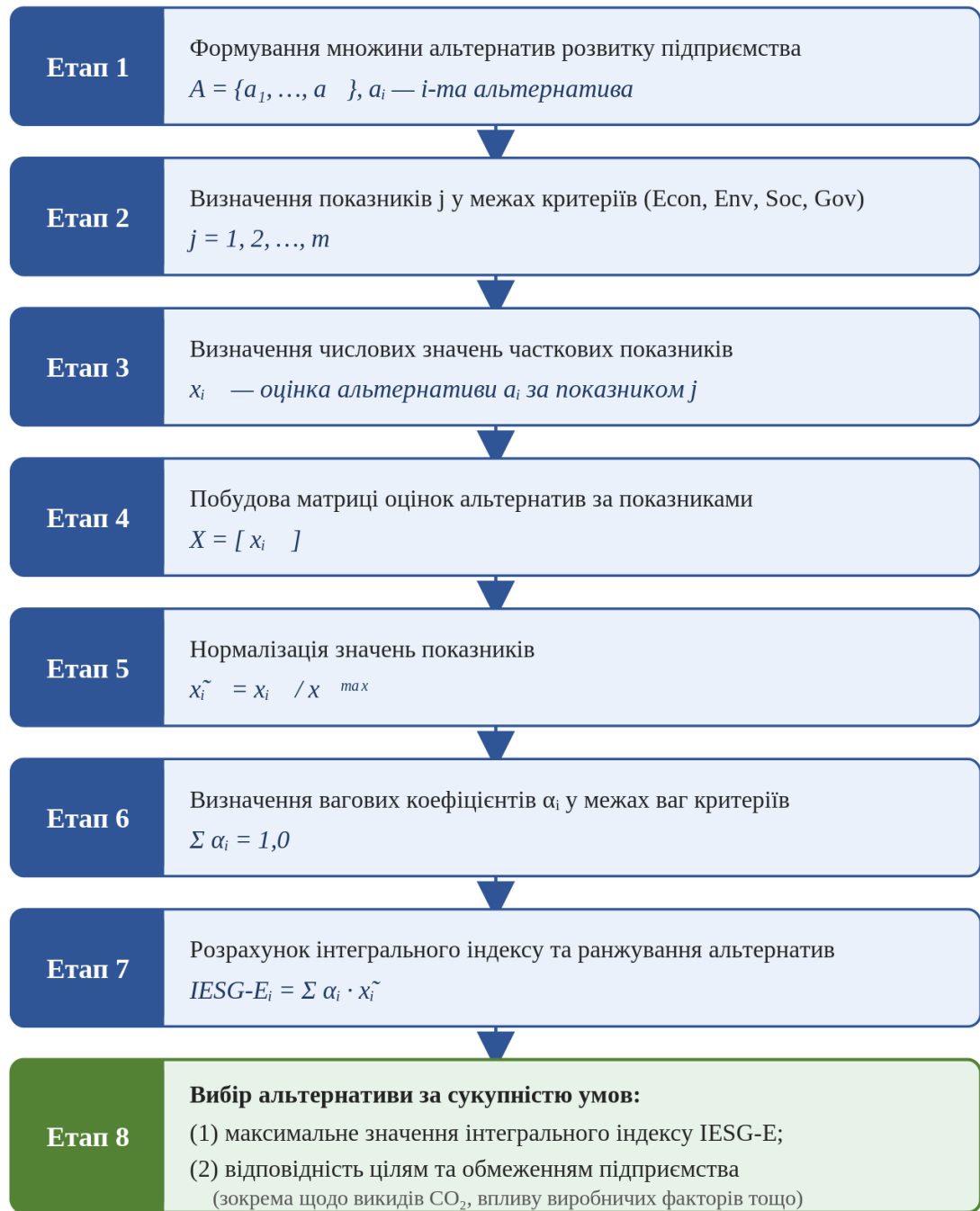


Рис. 3.2. Процедура інтегрального оцінювання альтернатив розвитку МСПП із застосуванням ESG-E-підходу

Джерело: розроблено автором.

Запропонований алгоритм відповідає логіці застосування методів багатокритеріального аналізу прийняття рішень. Його застосування дозволяє сформулювати перелік альтернатив розвитку підприємств в умовах обмежених ресурсів та з урахуванням стратегічних пріоритетів розвитку. При цьому на етапі

вибору (етап 8) пріоритет не надається автоматично альтернативі, яка математично має найвище значення індексу. Важливою додатковою умовою є дотримання системи обмежень та цілей підприємства. Тобто вибір здійснюється не за принципом «кращого з гірших» варіантів, а з умовою надання переваги рішенню, що одночасно відповідає обмеженням та цілям підприємства чи зовнішнього суб'єкта оцінювання (наприклад, дотримання обмежень щодо максимальних викидів CO₂, захворюваності персоналу через вплив виробничих факторів тощо), а також умові максимального значення інтегрального індексу серед альтернатив, що відповідають обмеженням суб'єкта оцінювання.

На основі запропонованого концептуального підходу сформовано портфель пріоритетних заходів, структурований за трьома часовими горизонтами, що відповідає реальним можливостям малих і середніх підприємств промислового рівня щодо інвестицій, організаційних змін та доступу до технологій. Сформований портфель пріоритетних заходів за часовими горизонтами наведено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Пріоритетні заходи забезпечення ефективності МСПП алюмінієвої галузі на засадах ESG-Е-підходу

Терміни	Захід	Econ / Env / Soc / Gov	Очікуваний економічний ефект	Очікуваний екологічний ефект	Інвестиції
Короткостроковий (0-12 міс.)	Оптимізація частки вторинного алюмінію у шихті, збільшення до 60-80%	Econ / Env	Зниження собівартості сировини на 15-30%	Зниження CO ₂ e на 50-70% порівняно з первинним Al	Низькі
	Впровадження системи 5S на виробничих дільницях	Gov / Econ	Зниження втрат часу та матеріалів на 5-10%	Зменшення відходів та розливів	Мінімальні
	Організація роздільного збору та внутрішнього рециклінгу стружки, дросів	Econ / Env	Повернення до 3-5% сировини у виробничий цикл	Зниження обсягу відходів на полігонах	Мінімальні
	Встановлення лічильників енергії по дільницях, запуск щомісячного моніторингу кВт·год/т	Econ / Gov / Env	Виявлення «точок втрат» -потенціал зниження на 5-8%	Зниження енергоємності	Низькі
	Базовий розрахунок вуглецевого сліду (Scope 1+2)	Gov / Env	Готовність до звітності за вуглецеві вимоги; зменшення ризиків торговельних бар'єрів	Базова лінія для декарбонізації	Мінімальні
Середньостроковий (1-3 роки)	Модернізація плавильних печей: заміна на енергоефективні індукційні, з рекуперацією	Econ / Env	Зниження витрат на енергію на 15-25%	Зниження енергоємності на 15-25%, зниження CO ₂ e	Середні
	Впровадження ISO: екологічний менеджмент та енергоменеджмент	Gov / Env / Econ	Системне зниження витрат; доступ до «зелених» тендерів	Постійне покращення еко-показників	Середні
	Впровадження Lean-інструментів: картування потоку (VSM), SMED, Kaizen-проекти	Gov / Econ	Зниження часу циклу на 10-20%, зменшення браку	Зменшення перевитрат сировини та енергії	Низькі-середні
	Цифровізація виробничого обліку: MES/ERP-модулі для відстеження сировини, енергії, відходів у реальному часі	Gov / Econ	Покращення планування, зниження простоїв	Точний облік - основа для оптимізації	Середні
	Програми навчання персоналу з енергоефективності, охорони праці, ESG-грамотності	Soc / Gov / Econ	Підвищення продуктивності, зниження травматизму	Зниження аварійних викидів	Низькі

Терміни	Захід	Econ / Env / Soc / Gov	Очікуваний економічний ефект	Очікуваний екологічний ефект	Інвестиції
Стратегічний (3-7 років)	Перехід на електроенергію з гарантіями походження відновлюваних джерел або укладання РРА з «зеленими» постачальниками	Env / Econ	Зниження ризику СВАМ-платежів; «зелена» премія від клієнтів	Зниження Score 2 CO _{2e} до 70-90%	Середні - високі
	Сертифікація за наявними стандартами	Gov / Econ / Env	Доступ до ланцюгів постачання OEM: автомобільна, аерокосмічна пром.; цінова премія	Підтвердження відповідальних практик	Високі
	Побудова замкнутого циклу: збір та переробка алюмінієвих відходів від клієнтів	Econ / Env	Додаткове джерело дешевої сировини	Зниження потреби у первинному Al; циркулярна модель	Середні-високі
	Інтеграція ESG-KPI у систему мотивації менеджменту та операційного персоналу	Gov / Econ / Soc	Стимулювання постійного покращення	Закріплення культури сталого виробництва	Мінімальні
	Участь у галузевих ініціативах зі сталого виробництва Al в Україні	Gov / Soc / Env	Спільне лобіювання, обмін практиками, зниження витрат на сертифікацію	Масштабування ефекту декарбонізації	Низькі

Джерело: розроблено автором на основі аналізу кращих практик IAI, ASI, OECD, UNIDO.

Варто звернути увагу на посилення регуляторного тиску на зовнішніх ринках, зокрема у зв'язку із запровадженням механізму вуглецевого коригування імпорту (далі - СВАМ) в ЄС. Імпортери Європейського Союзу або дотичні непрямі митні представники, які імпортують понад встановлений поріг у 50 тонн товарів, що підпадають під дію цього механізму, повинні подавати заявки на отримання статусу уповноважених декларантів СВАМ та здійснювати придбання відповідних сертифікатів у національних органів влади країни реєстрації. Вартість таких сертифікатів визначається на основі аукціонної ціни квот Європейської системи торгівлі викидами (€/т CO₂): як середнє значення за квартал у 2026 році та як середнє значення за тиждень, починаючи з 2027 року [105]. Ціна викидів вуглецю за тону CO₂ становить 90 євро [120]. Це формує додаткове фінансове навантаження на продукцію з високою вуглецевою інтенсивністю та безпосередньо впливає на конкурентоспроможність виробників алюмінію.

У цих умовах досягнення найбільш відчутного ефекту в короткостроковій перспективі пов'язане з оптимізацією співвідношення між первинним і вторинним алюмінієм. Зазначений захід належить до рішень типу «швидких результатів», оскільки не потребує значних капітальних вкладень, але забезпечує зниження виробничих витрат і вуглецевого сліду.

У середньостроковій перспективі пріоритетного значення набувають модернізація обладнання, впровадження систем екологічного й енергетичного менеджменту відповідно до стандартів ISO 14001 та ISO 50001, а також застосування принципів ощадливого виробництва, що формує організаційне підґрунтя для подальших трансформацій. У довгостроковому вимірі визначальними стають заходи, пов'язані з сертифікацією за міжнародними стандартами, переходом на відновлювані джерела енергії та розвитком циркулярних виробничих моделей, що відкриває доступ до міжнародних ринків і створює передумови для отримання «зеленої» цінової премії.

Актуальність окреслених напрямів обумовлена зростанням ролі алюмінію як стратегічного матеріалу та посиленням вимог до декарбонізації виробництва. У цих умовах для малих і середніх промислових підприємств формуються як додаткові

виклики, пов'язані з посиленням конкуренції за ресурси та регуляторним тиском, так і нові можливості, зокрема у сфері розвитку вторинної переробки, інтеграції до європейських ланцюгів створення вартості та освоєння нових ринкових ніш.

Щоб краще зрозуміти, як фактори впливають на малі й середні підприємства алюмінієвої галузі, їх логічно об'єднати навколо проблем і перспектив, пов'язаних із поточною політикою ресурсної безпеки та циркулярної економіки. Цей підхід дозволяє чіткіше побачити шляхи стратегічного реагування бізнесу, створюючи базу для розроблення комплексу управлінських рішень всередині пропонованих підходів економічної ефективності. Систематизацію відповідних викликів і можливостей для МСПП алюмінієвої галузі наведено у табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Виклики та можливості розвитку МСПП алюмінієвої галузі

Аспект	Виклик для МСПП	Можливість для МСПП
Стійкість постачання	Посилення конкуренції за сировину, зокрема за первинний алюміній і якісний брухт, з боку великих виробників, а також вплив цінової волатильності на Лондонській біржі металів.	Диверсифікація джерел сировини, формування стабільних відносин із постачальниками брухту, а також участь у програмах збору та сортування алюмінієвих відходів.
Низьковуглецевість	Зростання вимог з боку клієнтів і регуляторів щодо рівня вуглецевого сліду продукції, зокрема у зв'язку з дією механізму вуглецевого коригування імпорту, а також ризик втрати доступу до ринку Європейського Союзу.	Використання переваг вторинного виробництва, для якого показник CO ₂ e на 90-95 відсотків нижчий, ніж у первинного, та можливість отримання «зеленої» цінової премії.
Циркулярність	Потреба у забезпеченні простежуваності походження сировини за принципом контролю ланцюга постачання, а також необхідність інвестицій у системи обліку.	Алюміній є одним із найбільш придатних до рециклінгу матеріалів, оскільки може перероблятися практично нескінченно без втрати якості, а МСПП-переробники вже за своєю суттю функціонують у логіці циркулярної економіки.
ВДЕ	Зростаючий попит може перевищити виробничі потужності МСПП	Нові ринкові ніші: виробництво компонентів для ВДЕ, будівельних конструкцій для відновлення, транспортних деталей

Джерело: складено автором.

3.2. Економіко-математичне моделювання ESG-орієнтованого управління енергоефективністю та декарбонізацією МСПП

Попит на алюміній неухильно зростає внаслідок збільшення чисельності населення та розвитку виробництва. З цих причин найшвидше зростання спостерігається з 1970 року, що супроводжується недоліками, пов'язаними з викидами вуглецю [124]. З огляду на глобальні цілі досягнення нульових чистих викидів до 2050 року, алюмінієва промисловість залишається однією з восьми галузей, на які припадає приблизно 40% світових викидів парникових газів і які вважаються складними для скорочення [125]. Крім того, згідно зі звітом Всесвітнього економічного форуму, попит на алюміній суттєво зріс. Порівняно з 2022 роком, зростання попиту у 2023 році становить 2,7%; однак зусилля зі скорочення викидів парникових газів, зокрема використання вторинного алюмінію, призвели до зниження викидів на 2,3% [126]. Нагальна потреба скорочення викидів парникових газів, зокрема діоксиду вуглецю, зумовила значний науковий інтерес до цієї сфери. У наукових дослідженнях значна увага приділяється різним чинникам декарбонізації ланцюгів постачання, зокрема соціальному прогресу та рівням суспільного розвитку [127, 128], енергоємності у виробничих процесах [129], диверсифікації альтернативних джерел енергії в економіці [130, 131, 132], діяльності в межах циркулярної економіки [133], розвитку технологічних рішень в енергетичних секторах, пов'язаних із виробництвом критично важливої сировини [134] тощо.

З огляду на це, виробництво алюмінію нині стикається з викликами, зумовленими необхідністю збалансувати економічну ефективність та екологічну відповідальність. Ці питання можна успішно вирішувати завдяки концепції ESG, яка дає змогу інтегрувати принципи сталості з фінансовою ефективністю, зокрема в ланцюгах постачання алюмінію [135]. З цією метою пропонується удосконалення підходу до інтеграції енергоефективності та декарбонізації, що базується на моделюванні різних комбінацій використання первинного та вторинного алюмінію з подальшим оцінюванням економічних і екологічних наслідків. Його застосування

сприятиме створенню ефективних технологічних рішень і дозволить виробникам обґрунтовано обирати параметри виробництва з урахуванням екологічного сліду.

Виробництво первинного алюмінію залишається одним із найбільш енергоємних і вуглецевоємних промислових процесів. Попри поступове зниження інтенсивності викидів, електролітичне виплавляння й досі потребує значних обсягів електроенергії, що зумовлює високі прямі та непрямі викиди парникових газів [68]. Зокрема, за оцінками Лянь та ін., саме споживання електроенергії формує найбільшу частку екологічного впливу серед усіх стадій виробництва [136]. Це підтверджують і дослідження життєвого циклу, які вказують на визначальну роль електроенергії та тепла у формуванні потенціалу глобального потепління [136, 137].

У зв'язку з цим підвищення стійкості виробництва передбачає перехід на низьковуглецеві джерела електроенергії, зокрема відновлювані, а також впровадження сучасних технологій електролізу. Водночас такі рішення потребують належної техніко-економічної оцінки їх впливу [68, 136].

З огляду на високий екологічний слід первинного виробництва алюмінію, одним із типових підходів до розв'язання цієї проблеми є дослідження того, як можна використовувати алюмінієву суміш без погіршення її якості. Література сходиться на висновку, що виробництво вторинного алюмінію з брухту забезпечує суттєві енергетичні та кліматичні переваги порівняно з первинним видобутком. Систематичні огляди та емпіричні дані життєвого циклу матеріалу свідчать, що виробництво вторинного алюмінію потребує лише незначної частки енергії, необхідної для первинного виробництва, забезпечуючи істотну економію електроенергії та скорочення викидів парникових газів [68, 56].

У нещодавньому огляді Аль-Алімі та ін. [56] узагальнено підходи до рециклінгу алюмінію та виокремлено прямі й напівпрямі технологічні маршрути, які поєднують перероблення матеріалу з подальшим виготовленням виробів. Такі рішення дають змогу зменшити енергоспоживання й покращити екологічні показники за результатами оцінювання життєвого циклу [56]. Використання вторинного алюмінію також забезпечує істотне скорочення викидів парникових

газів порівняно з первинним виробництвом завдяки економії енергії та уникненню частини виробничих викидів [69]. Додатково принципи циркулярності сприяють зниженню виробничих витрат.

Водночас декарбонізація галузі залишається складним завданням. Первинний алюміній і надалі відіграє ключову роль у задоволенні попиту, зокрема з боку галузі електротранспорту та відновлюваної енергетики, проте супроводжується значним вуглецевим слідом [68]. Хоча вторинне виробництво є більш енергоефективним і екологічно прийнятним, його розвиток стримується недостатньою інфраструктурою [56, 138].

За цих умов поєднання екологічних та економічних підходів у межах ESG стає важливим чинником підвищення конкурентоспроможності виробників. Це відповідає загальній тенденції посилення політик декарбонізації, включно з вуглецевим ціноутворенням і стратегіями досягнення нульових викидів [128, 129, 130, 131]. У ширшому контексті йдеться про необхідність одночасного забезпечення енергетичної безпеки, доступності ресурсів і екологічної сталості, що є актуальним не лише для алюмінієвої галузі, а й для інших критично важливих матеріалів [130, 131, 134, 139, 140, 141, 142].

Хоча дослідження підтверджують енергетичні та екологічні переваги вторинного алюмінію, питання поєднання економічної ефективності та екологічних ефектів при виборі сировини залишається недостатньо вивченим. Зокрема, бракує робіт, у яких визначається оптимальне співвідношення первинного та вторинного алюмінію з урахуванням властивостей сплавів, вартості й ESG-показників. Наявні дослідження переважно зосереджені на технологічних аспектах і пропонують доволі загальні підходи до сталого виробництва.

З огляду на це доцільно застосувати підхід до оцінювання ефективності виробництва, який поєднує енергоефективність і декарбонізацію та дозволяє обґрунтувати структуру сировини у виробничому міксі. При цьому важливо враховувати технологічні обмеження виробництва сплавів, змінність витрат на енергію та сировину, а також екологічні показники, насамперед викиди парникових газів.

Для комплексної оцінки запропоновано інтегральний показник, що враховує енергоспоживання, рівень циркулярності та відповідність принципам ESG. Його розроблення становить один із елементів наукової новизни дослідження.

Моделювання здійснюється з урахуванням вимог міжнародного стандарту систем енергетичного менеджменту [51], зокрема щодо обліку викидів CO₂e та їх розрахунку на одну тонну виробленого алюмінію. Вихідні параметри енергоемності первинного та вторинного виробництва прийнято на основі даних Міжнародного інституту алюмінію [143] та Європейської алюмінієвої асоціації [144]. У розрахунках використано середні значення вуглецевої інтенсивності для первинного - P і вторинного - S алюмінію. Для моделювання оптимальних часток первинного та вторинного алюмінію у кінцевій суміші, відповідно x_P і x_S , використано умовні тарифи на електроенергію, щоб спростити сприйняття результатів. Отже, одним із параметрів моделювання є вуглецева інтенсивність національного електроенергетичного міксу - CI_e , з огляду на те, що електроенергія для виробництва може надходити з різних джерел і необхідним є усереднення на рівні національної економіки. Підхід, що ілюструє українську практику для цілей цього дослідження, може бути застосований у будь-якій країні - не лише для виробництва алюмінію, а й для інших сумішей, коли виникає потреба визначити оптимальну структуру складників за подібних енергетичних та екологічних обмежень.

Розрахунки виконано з використанням Python у Google Colab на основі таких показників:

I_{mix} - вуглецева інтенсивність матеріалу на тонну виробництва, що обчислюється як $x_P \cdot EF_P + x_S \cdot EF_S$, tCO₂e/т алюмінію. Показник поєднує внесок первинного - x_P і вторинного - x_S алюмінію з використанням їхніх коефіцієнтів викидів EF_P та EF_S . Зазвичай що більшою є частка вторинного алюмінію, то нижчим є I_{mix} .

Em_{tot} - сукупні річні викиди, пов'язані з матеріалом; обчислюються як $Q \cdot I_{mix}$, tCO₂e/рік, де Q - річний обсяг виробництва т/рік. Показник відображає масштаб впливу в tCO₂e за рік.

E_{mix} - середня енергоємність на тону, що відображає суміш енергетичних витрат для вторинного E_S та первинного алюмінію E_{P_loc} з урахуванням місцевих умов виробництва первинного; відповідно $E_{mix} = x_S \cdot E_S + x_P \cdot E_{P_loc}$; одиниця виміру - МВт·год/т.

$Energy_total$ - загальне річне споживання енергії, що обчислюється як $Q \cdot E_{mix}$; одиниця виміру - МВт·год/рік.

Em_scope2 - викиди від придбаної електроенергії (Scope 2 із рівнем, визначеним відповідно до ISO 50001). $Em_scope2 = Energy_total \cdot CI_e$, де CI_e - вуглецева інтенсивність електроенергетичного міксу $tCO_2e/МВт \cdot год$.

$Energy_cost$ - річні витрати на електроенергію, що обчислюються як $Energy_total \cdot Tarff$, де $Tarff$ - тариф на електроенергію у грошових одиницях за МВт·год. Одиниці: валюта/рік.

C_CO2 - грошове вираження викидів за ціною на вуглець p_CO2 . Відповідно в розрахунках використовується загальна вартість $C_CO2 = Em_tot \cdot p_CO2$ та чиста вартість C_CO2_net , що включає заліки або компенсації за вилучення викидів з атмосфери відповідно до логіки «чистих викидів» і принципів ESG. Одиниці: валюта/рік.

IIUE (інтегральний індекс утилізаційної ефективності) - індекс, розроблений як інтегральний показник ефективності використання, що є новизною цього дослідження:

$$IIUE = \alpha \cdot (M_reuse + M_rec + \beta \cdot M_WtE) / M_tot \cdot \gamma \cdot (1 - \delta \cdot Loss_rate) \quad (3.3)$$

де M_reuse - маса повторного використання,

M_rec - перероблення (рециклінг),

M_WtE - енергетичне відновлення, одержання енергії, відносно загальної маси M_tot , з ваговими коефіцієнтами α , β , γ , δ відповідно та штрафом за втрати $Loss_rate$.

$IIUE$ - індекс зі значеннями в інтервалі 0-1, який інтерпретується так: чим вищим є індекс, тим ефективнішим є виробництво з погляду енергоефективності та структури використаного алюмінію.

Слід чітко розмежувати три інтегральні міри, що застосовуються в роботі, аби уникнути подвійного врахування показників. Таксономічний показник характеризує загальний рівень (стан) сталого розвитку й обчислюється на повному наборі нормованих критеріїв усіх чотирьох блоків, виконуючи діагностичну функцію. Індекс IESG-E є інструментом підтримки управлінських рішень і будується на агрегованих блокових індексах (Econ, Env, Soc, Gov), а не на первинних показниках, тобто оперує іншим - узагальненим - рівнем даних. Індекс ПУЕ узагальнює виключно циркулярні показники матеріального потоку - повторне використання, перероблення та енергетичне відновлення - і входить до екологічного блоку як єдиний показник його циркулярної складової. Таким чином, циркулярність і емісії враховуються лише один раз: ПУЕ операціоналізує циркулярну компоненту екологічного блоку й не дублюється ані в таксономічній оцінці (де він бере участь як один нормований показник), ані в індексі IESG-E (де використовується вже агрегований екологічний індекс). Три міри різняться за призначенням (діагностика стану - вибір рішень - оцінювання циркулярності) та за рівнем вхідних даних, що й обґрунтовує доцільність їх спільного застосування.

Початкові параметри для базового прикладу отримано з фактичних виробничих, енергетичних та цінових даних реального підприємства алюмінієвої галузі. З міркувань конфіденційності назву підприємства не розкрито, а вихідні значення знеособлено та помірно усереднено, що не впливає на методику й відтворюваність розрахунків. Результати звірено з фактичними показниками підприємства. У таблиці 3.9 наведено ключові виробничі, енергетичні та вуглецеві показники базового сценарію з поясненням методики їх розрахунку.

Таблиця 3.9

Результати оцінки енергоефективності та викидів за базовим сценарієм

Показник	Значення та пояснення
Річний обсяг виробництва в базовому сценарії	$Q = 1000$ т/рік за базовим сценарієм
Співвідношення первинного та вторинного алюмінію в матеріалі	$xP = 0,40$ - первинний алюміній, $xS = 0,60$ - вторинний алюміній
Вуглецевий слід 1 т кожного типу алюмінію	$EF_P = 12,0$ тCO ₂ е/т (первинний алюміній); $EF_S = 0,5$ тCO ₂ е/т (вторинний алюміній)
Енергоспоживання на 1 тону матеріалу	$E_S = 0,8$ МВт·год/т (для вторинного); $E_P_loc = 0,0$ МВт·год/т (для первинного)
Вуглецева інтенсивність, ціни та компенсації викидів	$CI_e = 0,35$ тCO ₂ е/МВт·год; ціна електроенергії = 100 USD/МВт·год; ціна CO ₂ = 50 USD/т; Offsets = 100 тCO ₂ е/рік
Параметри ПУЕ	$M_reuse = 50$ т; $M_rec = 300$ т; $M_WtE = 20$ т; $M_tot = 1200$ т; $\alpha = 0,9$; $\beta = 0,7$; $\gamma = 0,8$; $\delta = 0,3$; втрати - 5%
Середній вуглецевий слід 1 т суміші	$I_mix = 0,4 \cdot 12 + 0,6 \cdot 0,5 = 5,10$ тCO ₂ е/т
Загальні річні викиди від матеріалів	$Em_tot = 1000 \cdot 5,10 = 5100$ тCO ₂ е/рік
Викиди з урахуванням компенсацій (offsets)	$Em_net = Em_tot - Offsets = 5100 - 100 = 5000$ тCO ₂ е/рік
Загальний обсяг використаної електроенергії за рік	$Energy_total = 480$ МВт·год/рік (за базовим сценарієм)
Середнє споживання електроенергії на 1 т продукції	$E_mix = xS \cdot E_S + xP \cdot E_P_loc = 0,60 \cdot 0,8 + 0,40 \cdot 0,0 = 0,48$ МВт·год/т
Річне споживання енергії, виходячи з обсягу виробництва	$Energy_total = Q \cdot E_mix = 1000 \cdot 0,48$ МВт·год/т = 480 МВт·год/рік
Прямі та непрямі викиди пов'язані з електроенергією	$Em_scope2 = Energy_total \times CI_e = 480 \times 0,35 = 168$ тCO ₂ е/рік
Річні витрати на електроенергію	$Вартість_e = Energy_total \times \text{ціна електроенергії} = 480 \times 100 = 48\,000$ USD/рік
Чому первинний алюміній не враховується в енергоспоживанні на місці	$E_P_loc = 0$, оскільки первинний алюміній закуповується на вигляді зливка й не потребує додаткового споживання електроенергії на підприємстві

Джерело: складено автором.

Результати розрахунків відповідно до базових параметрів $xP = 0,40$; $xS = 0,60$ наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Результати розрахунків ПUE для алюмінієвого міксу (40/60)

Базовий сценарій: $xS=0.60$, $xP=0.40$	Базовий сценарій: $xS=0.60$, $xP=0.40$
xP : 0.40	energy_total_MWh: 480.00
xS : 0.60	energy_cost: 48000.00
$I_{mix_tCO2_per_t}$: 5.10	carbon_cost_gross: 255000.00
Em_{net_tCO2} : 5000.00	carbon_cost_net: 250000.00
Scope2_from_electricity_tCO2: 168.00	Scope2_from_electricity_tCO2: 168.00
ПUE: 0.2151	ПUE: 0.2151

Джерело: складено автором.

Індекс ПUE становить 0,215, тобто 21,5%, що свідчить про значний потенціал для збільшення частки повторного використання, переробки та інтеграції принципів циркулярності у виробництво алюмінію. Переваги циркулярності також можна обґрунтувати шляхом розрахунку інтенсивності викидів для різних часток вторинного алюмінію (рис. 3.3).

Як видно з рис. 3.3, перехід від 40% до 20% первинного алюмінію xP : від 0,40 до 0,20 та відповідно від 60% до 80% вторинного: xS : від 0,60 до 0,80 знижує вуглецеву інтенсивність кінцевого продукту з 5,10 до 2,80 тCO₂е/т. За обсягу виробництва 1000 т/рік це забезпечує скорочення чистих викидів приблизно на 2300 тCO₂е/рік та економію витрат на CO₂ приблизно 115 тис. USD/рік (за ціни 50 USD/т CO₂). Водночас споживання електроенергії на виробничому майданчику зростає з 0,48 до 0,64 МВт·год/т, із 480 до 640 МВт·год/рік, однак додаткові витрати на енергію компенсуються суттєвим зменшенням вуглецевих платежів.

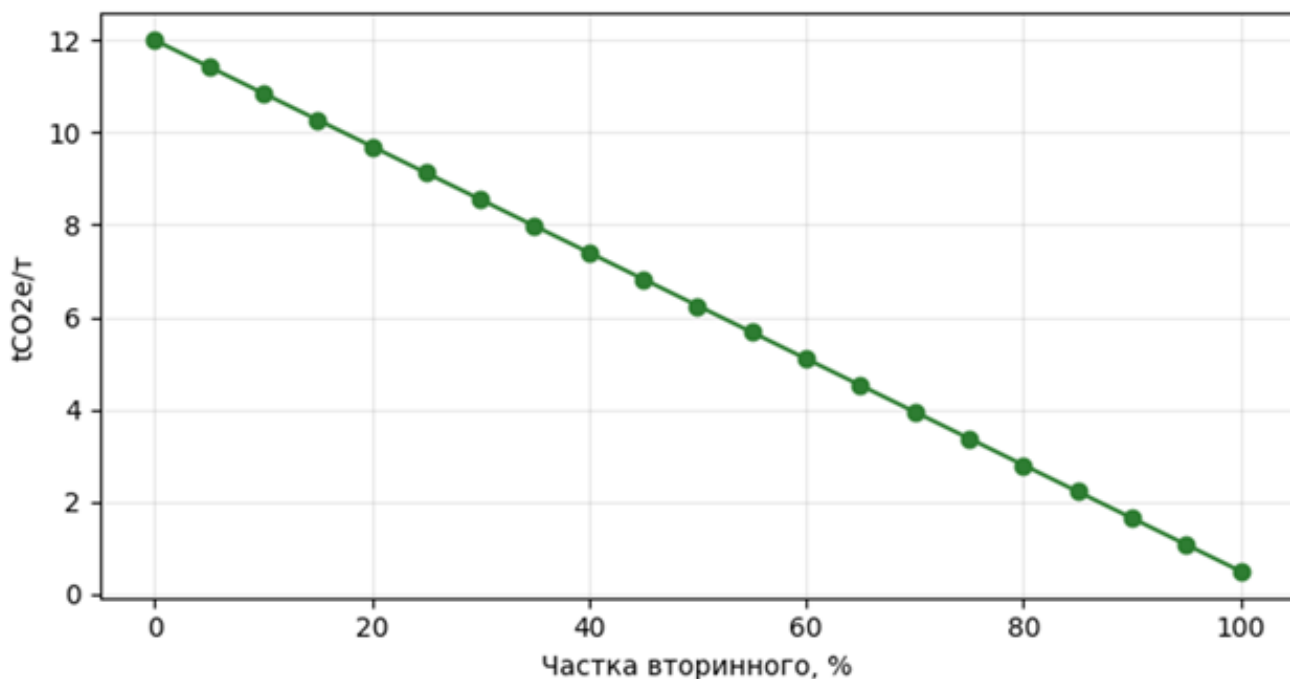


Рис. 3.3. Інтенсивність викидів на одну тонну залежно від зміни частки вторинного алюмінію

Джерело: побудовано автором.

Моделювання енергоємності та вартості викидів CO₂ для різних сценаріїв алюмінієвого міксу наведено на рис. 3.4.

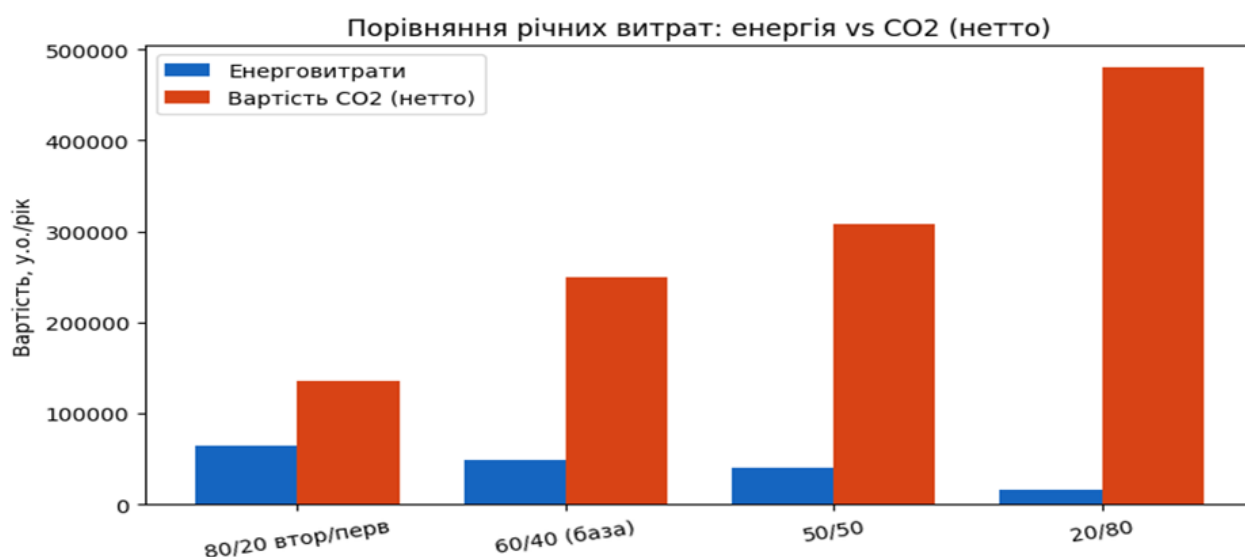


Рис. 3.4. Річні витрати на енергію та викиди CO₂ для різних сценаріїв співвідношення первинного і вторинного алюмінію

Джерело: побудовано автором за результатами сценарного моделювання енергоємності та річної вартості викидів CO₂ для різних співвідношень первинного (xP) і вторинного (xS) алюмінію (параметри табл. 3.9-3.10).

Узагальнюючи результати економіко-математичного моделювання, можна стверджувати, що запропонований підхід дає змогу кількісно оцінити економічні та екологічні наслідки зміни співвідношення первинного й вторинного алюмінію у виробничому міксі МСПП. Розрахований індекс ПІЕ на рівні 0,215 (21,5 %) засвідчує наявність значного резерву підвищення ефективності використання ресурсів за рахунок розширення частки вторинної сировини. Сценарне моделювання підтверджує, що збільшення частки вторинного алюмінію з 60 % до 80 % одночасно знижує вуглецеву інтенсивність продукції (з 5,10 до 2,8 тСО₂/т) та річні витрати на енергію, що робить декарбонізацію економічно вигідною для малих і середніх підприємств. Отримані результати обґрунтовують доцільність орієнтації виробничої стратегії МСПП на циркулярні рішення як інструмент, що поєднує зростання економічної ефективності з виконанням екологічних зобов'язань у межах ESG-E-підходу.

3.3. Інституційні та регуляторні підходи до сталого розвитку МСПП алюмінієвої галузі на основі ESG-звітності

Сьогодні, коли алюмінієва промисловість переосмислює себе, значення малих і середніх алюмінієвих підприємств зростає в контексті моніторингу дотримання принципів сталого розвитку. Замість масштабних макrorівневих структур акцент зміщується саме на підприємства, що виготовляють високорентабельні та вузькоспеціалізовані вироби, як на організації з високим потенціалом сталого розвитку. Задум реалізується крізь призму світових змін: скорочення вуглецевих викидів, підвищення ефективності використання енергії та формування нового цифрового укладу. У межах авторського підходу додатково обґрунтовано доцільність запровадження окремого показника «Ecop» та інтегральних індикаторів «ПІЕ» і «IESG-E», що розширюють інструментарій оцінювання. За сукупності цих умов виникають передумови для реального оновлення галузі. Адже трансформаційні процеси в галузі формуються переважно на рівні суб'єктів господарювання, що забезпечує їх більшу гнучкість та ринкову адаптивність. Це дозволяє забезпечити ринок без надлишкового виробництва. Саме

МСПП мають необхідну мобільність для оптимізації виробництва та впровадження технологій Індустрії 5.0 на базі ESG-звітності [162]. Зазначені чинники дозволяють зберегти конкурентні позиції підприємства у динамічному зовнішньому середовищі.

Цей підхід має на меті запровадження чіткої нефінансової звітності, зрозумілої для всіх учасників ринку. Внутрішні дані, зокрема енерговитрати та обсяги CO₂, стандартизуються через систему MRV [165], що забезпечує використання узагальнених шкал вимірювання замість розрізнених методик. Показники, такі як частка вторинного алюмінію, стають прозорими завдяки незалежній верифікації їх походження, як правило, після сертифікації. Це дає змогу інвесторам оцінювати реальні досягнення компаній у сфері сталого розвитку, а регуляторам - оптимізувати контролюючі процедури без надмірного адміністративного навантаження. У результаті підвищується довіра до оприлюднених даних з боку міжнародних партнерів, а оцінювання ґрунтується на перевірених та доступній для зовнішнього аналізу інформації без розкриття комерційної таємниці підприємства.

Конкурентоспроможність українських малих і середніх підприємств у ЄС безпосередньо залежить від прозорості нефінансової звітності. Тому підприємствам слід використовувати стандарти Глобальної ініціативи зі звітності, а також інші відповідні міжнародні стандарти розкриття інформації під час розробки набору показників сталого розвитку та аналізу ризиків зміни клімату. МСПП також слід розуміти, що їм необхідно мати надійну базу даних ресурсів, перш ніж вони зможуть створювати таку звітність. Першим кроком є впровадження внутрішньої системи управління на основі міжнародних стандартів (наприклад, екологічний менеджмент, енергоефективність або охорона праці). Надійні внутрішні процедури дозволять організації збирати, аналізувати та оцінювати нефінансові показники ефективності послідовно, які зрештою будуть перетворені на звіти ESG, зрозумілі для європейських партнерів.

Прикладні пропозиції доцільно співвіднести з фактичним станом вітчизняного вторинного сегмента алюмінієвої галузі. За оцінками аналітичного

центру Асоціації «УкрАлюміній», попри умови воєнного стану понад 40 % спожитого в Україні у 2023 р. алюмінію забезпечено вторинною переробкою, а основними джерелами брухту є технологічні обрізки листа, використане пакування, фольга та виробничі відходи [192]. Водночас ресурсна база переробки звужується: якщо до 2022 р. заготівля брухту чорних і кольорових металів сягала близько 4 млн т на рік, то у 2022-2025 рр. вона стабілізувалася на рівні 1,5-2 млн т (близько половини довоєнного обсягу), при тому що профільну переробку металобрухту в країні забезпечують близько 44 підприємств [193]. Окремі члени асоціації демонструють високу ефективність замкнених циклів (повернення до 92 % технологічних відходів фольги у виробництво; зниження споживання газу на 17 % і викидів CO₂ на 12 % за рахунок рекуперації тепла плавильних печей). Наведені дані підтверджують, що навіть за обмеженої та звуженої ресурсної бази вітчизняний вторинний сегмент має суттєвий потенціал сталого розвитку, реалізація якого потребує запропонованих у роботі інструментів стимулювання - пільгового оподаткування операцій із вторинною сировиною, муніципального роздільного збору брухту та грантової підтримки модернізації потужностей.

В умовах українського промислового контексту впровадження зазначених підходів набуває особливої ваги через високу залежність від імпортової сировини та значну частку енергетичних і матеріальних витрат у собівартості, що підсилює потребу в контролі ресурсоефективності та системному моніторингу відповідних показників. Водночас перевірена ESG-Е-звітність розширює доступ підприємств до фінансування, ринків і державної підтримки, що зумовлює використання ESG-Е-показників як основи спеціалізованих інструментів стимулювання для МСПП. Узагальнення таких підходів до інтеграції нефінансової звітності у взаємодію бізнесу та держави наведено у таблиці 3.11.

Пропозиції щодо можливих інструментів стимулювання сталого розвитку алюмінієвих МСПП

Напрямок підтримки	Опис концептуальної ініціативи	Можливі шляхи застосування ESG-звітності	Цільові ESG-індикатори та метрики
Оптимізація екологічної звітності	Спрощення процедур збору показників для МСПП шляхом уніфікації та цифровізації даних	Використання єдиного формату ESG-звіту замість розрізнених форм екологічного та статистичного контролю	Прямі та непрямі викиди парникових газів за протоколом GHG, питома енергоспоживання на тонну ливарної продукції; відсоток вторинного алюмінію у сировині
Стимулювання зелених інвестицій	Формування механізмів податкових преференцій для підприємств, що системно знижують вплив на довкілля	Застосування верифікованих екологічних показників як базового критерію для отримання пільг на інноваційне обладнання	Обсяг капітальних інвестицій у низьковуглецеві технології, частка використання вторинного алюмінію у загальному обсязі сировини; впровадження систем енергоменеджменту ISO 50001
Доступ до пільгового фінансування	Розширення можливостей кредитування ресурсоефективної модернізації виробничих потужностей	Використання ESG-паспорта підприємства як конкурентної переваги при отриманні державних гарантій, субсидій чи грантів	Значення інтегрального індексу ПІУЕ, наявність впроваджених систем управління за стандартами ISO 14001 та ISO 50001; рівень фінансової прозорості
Адаптація до вимог СВМ та підтримка експорту	Забезпечення моніторингу вуглецевого сліду продукції для збереження конкурентоспроможності на ринку ЄС	Інтеграція верифікованих даних формату MRV у супровідну документацію для європейських контрагентів	Питома вага викидів CO ₂ -еквівалента на одиницю експортованої продукції, частка відновлюваної енергії в енергобалансі підприємства; ступінь відповідності формату MRV міжнародним вимогам
Підтримка циркулярних ініціатив	Мотивація до безвідходного виробництва та глибокої переробки алюмінієвого брухту	Врахування показників управління відходами при формуванні рейтингів надійності постачальників	Коефіцієнт утилізованих відходів виробництва, рівень циркулярності на підприємстві

Напрямок підтримки	Опис концептуальної ініціативи	Можливі шляхи застосування ESG-звітності	Цільові ESG-індикатори та метрики
Екологічна відповідальність та соціальна відповідальність	Впровадження систем оцінки впливу на суспільство та довкілля на рівні МСПП	Публічна звітність за принципами GRI; інтеграція ESG-цілей у внутрішні KPI	Рівень травматизму (LTIFR); інвестиції у розвиток та безпеку персоналу; рівень прогулів та невиходів на роботу; частка персоналу, що проходить навчання з безпеки та ESG
Управління ризиками та прозорість даних	Впровадження єдиної методології управління даними та внутрішніх аудиторських процесів	Нормативні вимоги до публікації ESG-звітності; незалежна верифікація даних	Рівень довіри інвесторів та кредиторів; частка даних з незалежною верифікацією
Підтримка економічної ефективності та І ESG-E сталості	Інтегральний індекс ефективності управління за ESG-практиками з відокремленою економічною складовою	Використання критерію для рейтингу МСПП; прив'язка до систем управління та цифрових платформ	Рівень інтеграції ESG-процесів; ваговий внесок ESG-ініціатив у загальну ефективність виробництва; інтегральний бал І ESG-E від 0 до 1.

Джерело: розроблено автором на основі: [148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184].

У перспективі принципи ESG-E можуть бути інтегровані в існуюче нормативне поле, що відображено в таблиці 3.12. Це створить базові інституційні передумови для їх масштабування, але без важкого навантаження на МСПП. Замість того щоб залишатися окремими самостійними кроками, такі підходи сприятимуть переходу до системної державної стратегії з питань сталого розвитку. У рамках цього процесу нефінансова звітність набуде ролі каналу взаємодії між компаніями, громадськістю та владою.

Таблиця 3.12

Напрями інтеграції принципів ESG-E в практики державного партнерства та регулювання діяльності алюмінієвих МСПП

Сфера регулювання	Принципова пропозиція щодо інтеграції ESG-критеріїв	Очікуваний синергетичний ефект для держави та бізнесу
Ризик-орієнтований державний нагляд	Плануючи контрольні заходи, потрібно враховувати наявність верифікованої публічної ESG-звітності як основного фактора для зниження ризику бізнесу підприємства. [153]	Зменшення адміністративного навантаження на добросовісний, «білий» бізнес; оптимізація витрат державних органів на перевірки за рахунок фокусу на ризикових суб'єктах.
Екологічна політика та охорона довкілля	Мотивація МСПП до добровільного проведення екологічного аудиту й впровадження систем енергоменеджменту шляхом цільового субсидювання	Формування достовірної бази даних про емісію парникових газів, прискорення переходу до вуглецево-нейтрального виробництва.
Корпоративна та фінансова звітність	Поступове впровадження стандартизованих рекомендацій щодо розкриття основних нефінансових показників сталого розвитку в рамках річної фінансової звітності.	Підвищення інвестиційної привабливості вітчизняних підприємств; гармонізація національних стандартів звітності з європейськими директивами для полегшення доступу до відповідального фінансування [164].
Система публічних закупівель та інші напрямки публічно-приватного партнерства	Застосування питомих екологічних та соціальних індикаторів як додаткових нецінових критеріїв оцінки тендерних пропозицій постачальників та інших програм публічно-приватного партнерства.	Створення гарантованого попиту на продукцію з низьким вуглецевим слідом, стимулювання чесної конкуренції на засадах сталого розвитку, тобто «екологічно стійка економічна діяльність» відповідно про Положення про Таксономію [165].
Інноваційна та промислова політика	Надання пріоритетного доступу до програм державної підтримки підприємствам, які впроваджують технології циркулярної економіки та глибокої переробки вторинної сировини.	Прискорення технологічної модернізації галузі, зниження імпортозалежності виробництва за рахунок ефективного використання внутрішніх ресурсів. Використання пільги на швидку амортизацію обладнання.

Джерело: розроблено автором.

Практична реалізація зазначених підходів потребує дієвості через кількісно вимірювані індикатори. Основа методики - не просто набір правил, а злиття аналізу життєвого шляху виробів й цифрових даних у єдиний процес. Таке поєднання дає можливість отримати чіткі показники: наприклад, рівень CO₂ на одиницю продукції, частка енергетичних викидів, а також коефіцієнт переробки вторинної сировини. Кожен із них має значення для реального стану справ. Водночас комплексний підхід до сталого розвитку вимагає виходу за межі суто екологічного виміру та включення соціальних і управлінських аспектів діяльності. Спираючись на систематизовані методичні підходи та міжнародні стандарти розкриття нефінансової інформації було сформовано розширену матрицю базових індикаторів, наведені в таблиці 3.13. Ці критерії є мінімально необхідним базисом для формування повноцінного ESG-Е-паспорта підприємства та впровадження якісної звітності формату MRV.

Система індикаторів формує чіткі межі, в межах яких МСПП алюмінієвої галузі можуть інтегрувати ESG-Е-показники у поточне й довгострокове планування. На практиці це працює так: стандартний перелік метрик враховує обмежені ресурси таких компаній, тож реалізація стає простішою. Кожен крок супроводжується цифровим виміром - контролем змін, аналізом результативності та оновленням стратегії в межах процесу MRV. Очевидно, що звітність більше не виглядає як непосильне навантаження. Той самий набір даних полегшує зіставлення між підприємствами, оскільки ґрунтується на узгоджених нормах. Як результат, компанії швидше переходять до вимірювань, які мають практичну цінність.

Таблиця 3.13

Базова система економічних та ESG-E-індикаторів для звітності МСПП алюмінієвого виробництва

Блок	Індикатор (KPI)	Одиниця виміру	Джерело даних для верифікації	Період	Зв'язок із стратегією підприємств та оцінками ефективності діяльності
Econ	Собівартість продукції	грн/т, USD/т	Управлінський облік, калькуляція витрат	Місяць	Базовий показник економічної ефективності виробництва
	Операційна рентабельність	%	Фінансова звітність (Звіт про фінансові результати)	Квартал / рік	Інтегральний фінансовий результат ефективності управління та ESG-інтеграції
	Продуктивність праці	т/чол., грн/чол.	Управлінський облік, кадрова статистика	Місяць / квартал	Оцінка ефективності використання трудових ресурсів
	Частка енерговитрат у структурі собівартості	%	Управлінський облік, енергетичний баланс	Місяць	Контроль фінансової енергоефективності підприємства
	Підвищення ефективності використання вторинної сировини	%	Виробничі звіти, дані закупівель	Місяць	Економічний ефект від впровадження принципів циркулярної економіки
	Питоме енергоспоживання	кВт·год/т	Дані приладів обліку, енергетичний баланс	Місяць	Базовий параметр операційної та економічної ефективності
E	Вуглецевий слід за Score 1 та 2	тCO ₂ e/т	Аналітичний розрахунок на основі споживання палива та е/е	Квартал	Ключовий індикатор декарбонізації та підготовки до CBAM
	Частка вторинного алюмінію	%	Журнали плавки, первинна документація закупівель	Партія / місяць	Ключова змінна сценарного моделювання, зниження викидів
	Коефіцієнт утилізації відходів	%	Регістри еколог. обліку п-ва	Рік	Показник рівня переходу до циркулярної економіки
	Рівень циркулярності використання матеріалів	%	Виробничі та екологічні звіти	Рік	Інтегральний показник замкнутого циклу виробництва
	Питоме енергоспоживання з відновлюваних джерел	%	Енергетичний баланс, договори на постачання зеленої е/е	Місяць / рік	Індикатор переходу на чисту енергетику та зниження Score 2
S	Рівень виробничого травматизму LTIFR	випадків / 1 млн год	Журнали з охорони праці, кадрова статистика	Квартал	Відображення ефективності системи менеджменту ISO 45001

	Інвестиції у розвиток та безпеку персоналу	тис. грн / працівника	Бухгалтерський облік, звіти відділу кадрів	Рік	Показник соціальної відповідальності роботодавця
	Рівень прогулів та невиходів на роботу	% робочого часу	Табелі обліку робочого часу	Квартал	Індикатор соціального клімату та ефективності HR-політики
	Частка персоналу, що проходить регулярне навчання з безпеки та ESG	%	Звіти відділу кадрів та служби охорони праці	Рік	Підвищення рівня корпоративної культури та обізнаності
G	Рівень надійності / простежуваності ланцюга постачання	%	Дані комерційного відділу та служби безпеки	Рік	Відповідність галузевим вимогам ініціативи ASI щодо верифікованих постачальників
	Інтеграція ESG-цілей у систему управління	KPI	Внутрішні положення про преміювання та мотивацію	Рік	Індикатор зрілості корпоративного управління. Наявність KPI сталого розвитку для менеджменту
	Рівень верифікації ESG-даних	%	Внутрішній аудит, зовнішня перевірка	Рік	Підвищення довіри інвесторів та кредиторів
	Наявність внутрішніх комплаєнс політик (етика, ESG)	бінарний показник / інд.зрілості	Внутрішні нормативні документи	Рік	Прозорість управління та відповідність міжнародним стандартам
	Рівень цифровізації процесів управління виробництвом	% процесів у ERP/MES	ERP/MES системи підприємства	Рік	Підвищення ефективності управління та стратегічного планування
	Частка процесів із застосуванням AI / Digital Twin [167, 172]	%	ІТ-системи, дані сенсорів, прогноз браку	Рік	Підвищення точності прогнозування, оптимізація виробництва
	Частка працівників, охоплених ESG-стимулюванням	%	HR-звіти, табелі обліку робочого часу, графіки змін	Квартал	Адаптація до енергоринку, стимулювання енергоефективної поведінки (вихід в нічну зміну під надлишок чистої e/e)
	Інтегральний індекс ІІUE	значення від 0 до 1	Розрахункова математична модель	Квартал	Головний інтегральний показник екологічної ефективності
	Інтегральний індекс ефективності IESG-E	значення від 0 до 1	Розрахункова математична модель	Квартал / рік	Комплексна оцінка альтернатив управлінських рішень на засадах ESG

Примітка: Згадані ERP/MES-системи для малих і середніх підприємств у сфері алюмінію - це реальна економічна вигода, коли обираються модульні чи хмарні платформи. Поступова цифрова трансформація процесів дає змогу контролювати витрати й точно налаштовувати функції під потреби компанії. На перших кроках замість складних систем часто працюють прості рішення: наприклад, електронні таблиці чи спецпрограми для обліку. Такий підхід гарантує старт автоматизації без великих витрат, одночасно закладаючи основу для майбутнього переходу на комплексні ERP (система планування ресурсів)/MES(цеховий рівень)-рішення [168].

Інструментарій, побудований на основі інтегральних індексів IIUE та IESG-E разом із галузевими показниками, не копіює наявні ESG-підходи - це вже окрема методична схема, створена з урахуванням специфіки малого й середнього бізнесу в алюмінієвій промисловості. Замість того щоб дивитись на екологічні, соціальні та управлінські аспекти окремо, нова модель поєднує їх у єдиний процес аналізу разом з фінансовими показниками, адаптованими до глобальних норм. Це не просто комбінація чинників, а переосмислення принципів оцінки. Підхід формується крок за кроком, без жорстких рамок минулого. Оскільки світові стандарти стають основою, система працює через поступове накопичення відповідності. Уся логіка тримається на взаємозв'язку всіх частин водночас. В результаті можливий стрибок від формальної звітності до конкретних, моніторингових, практично корисних даних про сталість. Основні складові такої наукової відмінності подано у таблиці 3.14.

Таблиця 3.14

Порогові значення ESG-E-індикаторів

Критерій	Індикатор (KPI)	Одиниця виміру	Порогові значення	Джерело
Econ	Динаміка зниження собівартості продукції (у % до попереднього періоду)	%	≥ 2	
	Операційна рентабельність	%	≥ 0	[174]
	Динаміка підвищення продуктивності праці (у % до попереднього періоду)	%	≥ 3	
	Частка енерговитрат у структурі собівартості	%	≤ 45	[175]
	Питоме енергоспоживання	кВт·год/т	$\leq 1\,200$	[175, 176, 177]
	Підвищення ефективності використання вторинної сировини (динаміка зростання)	%	≥ 2	[175, 176, 177]
E	Вуглецевий слід за Score 1 та 2	тCO ₂ е/т	$\leq 2,0$	[149, 175, 176, 177]
	Частка вторинного алюмінію	%	≥ 30	[150, 175, 176, 177]
	Коефіцієнт утилізації відходів	%	≥ 50	[178, 179]
	Рівень циркулярності використання матеріалів	%	≥ 20	[180]
	Питома частка енергії з відновлюваних джерел	%	0 та >	[175]
S	Рівень виробничого травматизму LTIFR	випадків / 1 млн.год.	< 8	[181]

Критерій	Індикатор (KPI)	Одиниця виміру	Порогові значення	Джерело
	Інвестиції у розвиток та безпеку персоналу	тис. грн./прац.	0 та >	[181]
	Рівень прогулів та невиходів на роботу	% робочого часу	< 8	[181]
	Частка персоналу, що проходить навчання з безпеки та ESG	%	≥ 30	[182]
G	Рівень надійності ланцюга постачання	%	≥ 50	автор
	Інтеграція ESG-цілей у систему управління	KPI	так	автор
	Рівень верифікації ESG-даних	%	≥ 20	[183]
	Наявність внутрішніх комплаєнс політик (етика, ESG)		так	
	Рівень цифровізації процесів управління	%	≥ 20	[172, 184]
	Частка процесів із застосуванням AI / Digital Twin	%	≥ 5	[172, 185, 186]
	Частка працівників, охоплених ESG-стимулюванням	%	≥ 15	[187]
Інтегральний індекс утилізаційної ефективності ІІUE)		0-1	≥ 0,20	автор
Інтегральний індекс IESG-E		0-1	≥ 0,20	автор

Джерело: розроблено автором.

Примітка: Для присвоєння рівня всі критерії відповідного рядка мають виконуватися одночасно. Порогові значення підлягають перегляду кожні 1-3 роки на основі оновлених галузевих даних.

Щоб оцінити ефективність роботи малих і середніх алюмінієвих підприємств та визначити, чи враховують вони екологічні, соціальні й управлінські фактори, застосовують спеціальні граничні показники, підтверджені практикою та ринковими реаліями. Рентабельність діяльності хоча б на межі нульового прибутку означає, що компанія покриває всі витрати, тому цей рівень стає базовою планкою фінансової стійкості [145]. Водночас фінансова стійкість неможлива без системного зниження витрат: граничним орієнтиром вважається щорічне скорочення собівартості продукції не менш ніж на 2 %, що свідчить про реальну оптимізацію виробничих процесів, а не лише номінальне утримання беззбитковості [169]. У контексті великих енерговитрат, які тепер становлять до 45 % собівартості металу замість колишніх 25-30 %, важливо не перевищувати позначку в 45 %. Цей індикатор диференціює підприємства з критичною енергозалежністю від тих, що здатні зберігати конкурентоспроможність. На фоні цього нормою вважається споживання не більше 1 200 кВт·год на одну тону продукції. Згідно з даними

Міжнародного інституту алюмінію, на первинне виробництво йде приблизно 14 500-15 000 кВт·год/т [187]. У цей час повторне використання алюмінію скорочує витрати енергії майже на 95%. Ознака прогресу простежується там - коли компанія переходить від малоефективних методів до активного застосування вторинної сировини. У цей час, разом із раціональним використанням енергії, важливим маркером стає ефективність працівників - стратегічна планка ледь перевищує 3% щороку, показуючи можливість нарощувати обсяги без додаткового навантаження на людей; такий рух часто вказує на міцне становище серед учасників ринку.

Зміни у природному середовищі посилюють необхідність переходу до замкнутої моделі господарювання - контроль за кліматичним навантаженням стає ключовим. Показник викидів CO₂ має триматися на позначці не більше 2,0 тCO₂е на кожен тону алюмінію. Хоча виробництво первинного алюмінію "від видобутку до готового матеріалу" дає понад 15 тCO₂е/т, повторне використання майже завжди обходиться в 0,5 тCO₂е/т. Тому такі рамки автоматично сприяють зростанню частки вторинної сировини й використанню менш забруднюючих джерел енергії. На початковому етапі частка електроенергії з відновлюваних джерел повинна бути хоча б мізерною - понад нульову позначку, що символізує вступ до процесу ESG-Е-змін. Подальший шлях передбачає системне нарощування цього показника: від 10 % до значень у межах 40 % та навіть більше. Інтеграція принципів замкнутого циклу підтверджується вимогою відносного зростання частки вторинної сировини щонайменше на 2% до попереднього звітного періоду. Таким чином, вимога «зростання на $\geq 2\%$ » - це щорічний маркер того, що підприємство не стоїть на місці, а планомірно, з року в рік, заміщує енергомісткий первинний метал екологічним вторинним. Водночас, в кінцевому виливку доля переробленого алюмінію повинна бути не меншою за 30% - цей показник уже є критичним порогом, бо світові лідери демонструють 60-80%. У той же час рециркуляція відходів має перевищувати половину обсягу, адже саме такий рівень забезпечує мінімальну відповідність екостандартам, коли вже типовими значеннями вважаються 50-75%. Матеріали загалом мають циркулювати щонайменше на рівні 20%, що узгоджується з даними

Євростату (24,6% для металів у 2023 році) і підтверджує впровадження ефективних циркулярних практик на міжнародному рівні [177].

Замість простої статистики, рівень виробничого травматизму - це ключ до розуміння стану охорони праці: норма у 8 чи менше випадків на кожний мільйон відпрацьованих годин слугує точкою відліку. Коли ця планка порушується, це не окремий збіг, а знак глибинних проблем у системі управління ризиками, особливо серед малих і середніх компаній. Без жодного заперечення, ріст потенціалу співробітників потребує реальних вкладень - принаймні певної суми коштів на одного працівника щороку. Такі видатки стають основою для запуску практичних заходів: навчання, медичне забезпечення, профілактичні програми. Ще одним дзеркалом внутрішнього клімату є частота відсутності на роботі - якщо більше ніж кожен двадцятий день проводиться поза офісом без поважних причин, то процеси вже дають збої. Щонайменше кожен третій співробітник має пройти підготовку з безпеки й сталості - це ключова умова для запуску корпоративних ESG-E-ініціатив. Такий рівень поглибленої участі визначено Міжнародною організацією праці як мінімально достатній. Вимога знаходиться в рамках рекомендованого діапазону 25-35%, закріпленого в стандарті ISO 45001. Значення у 30% чітко потрапляє до прийнятних меж на початковому етапі реалізації програм. Загальноприйняті практики враховують не лише формальне навчання, але й реальну інтеграцію у процеси. Стандарти передбачають системний підхід, де освіта стає частиною загального управління ризиками.

Оцінка управлінської структури й технічного оновлення базується на комбінації внутрішніх показників і цифрових індексів. Хоча принаймні половина виконання графіку поставок - це вже мінімум для уникнення перебоїв, проте оптимальний діапазон знаходиться значно вище. Прозорість у роботі компанії вимагає незалежного підтвердження частини екологічних і соціальних даних. Завдання перевіряти щонайменше кожену п'яту одиницю ESG-E-інформації не випадкове: воно спирається на аналіз світової практики. Згідно з дослідженням консалтингової компанії KPMG [180], лише близько третини компаній мають будь-яку форму зовнішньої перевірки ESG-звітності. Тому поріг у 20% є не надмірним,

а цілком реалістичним з огляду на сучасну практику. Впровадження цифрового обліку принаймні кожної п'ятої операції стає межею входу до сучасних виробничих систем. Згідно з Євростатом, серед малого та середнього бізнесу в Євросоюзі такий рівень досягла приблизно кожна п'ята компанія - це обмежує поширення застарілих методів управління. Хоча технології на кшталт штучного інтелекту чи цифрових двійників задіяні всього у 5% виробництва, сам факт уже появи вказує на першу хвилю оновлень. Адже повний перехід потребував би великих коштів, плюс світові дані показують: третина фірм експериментує з цифровими аналогами реальних процесів. Станом на сьогодні стимулювання працівників до досягнення ESG-E-цілей має охоплювати понад 15% персоналу. Водночас, за даними досліджень у Північній Америці, лише незначна частка організацій інтегрує ESG-показники в довгострокові програми мотивації. Хоча залучення 15% працівників до метрик енергозбереження, переробки чи техніки безпеки може здаватися скромним, цей рівень уже перевищує середні практики. Багато компаній досі не впровадили подібні механізми, тоді як лідери ринку планують охопити ними до третини або навіть половини персоналу.

Присвоєння ESG-E-рейтингу є автоматичним результатом подання верифікованого ESG-E-паспорта та визначає обсяг доступних інструментів державної підтримки. Таблиця 3.15 демонструє та описує структуру базових елементів такої системи, що перетворює розрізнені екологічні та виробничі дані на уніфікований ESG-E-паспорт підприємства. Цей механізм допомагає українським виробникам потрапити всередину європейської економічної мережі.

Базові елементи MRV-системи ESG-E-звітності для МСПП алюмінієвої галузі

Елемент системи	Зміст та ключові вимоги	Відповідальні особи або підрозділи
1. Мінімальний звіт у форматі ESG-паспорта	Профіль: виробнича потужність, тип застосованої технології, номенклатура продукції. Економіка (Econ): фактичні значення індикаторів операційної рентабельності, собівартості, енерговитрат та продуктивності праці у порівнянні з цільовими порогами (Таблиця 3.14). Екологія (E): показники викидів CO ₂ , частки вторинного алюмінію, утилізації відходів, циркулярності матеріалів та відновлюваної енергії. Соціум (S): індикатори травматизму, прогулів, навчання персоналу та інвестицій у його розвиток. Управління (G): рівень верифікації ESG-даних, наявність комплаєнс-політик, цифровізація процесів, інтегральні індекси утилізаційної ефективності (IIUE) та IESG-E.	Керівник підприємства, директор з виробництва
2. Періодичність та глибина моніторингу	Щомісячний (внутрішній): оперативний контроль відхилень ключових енергетичних та екологічних показників, реагування на перевищення порогових значень. Щоквартальний: аналіз динаміки соціальних та виробничих індикаторів, порівняння з цільовими KPI. Щорічний (публічний): формування консолідованого ESG-паспорта для зовнішніх стейкхолдерів; перегляд порогових значень кожні 1-3 роки на основі оновлених галузевих даних.	Головний інженер, енергоменеджер
3. Інструментарій збору та обробки даних	Автоматизовані системи обліку енергоносіїв. Інтеграція екологічних та соціальних метрик у корпоративні ERP-системи. Застосування інструментів штучного інтелекту та технологій цифрових двійників для моніторингу виробничих процесів. Автоматизований розрахунок інтегральних індексів на основі фактичних значень KPI.	Відділ автоматизації, IT-спеціаліст, бухгалтерія
4. Формат розкриття інформації	Структурований ESG-паспорт з блоками Econ / E / S / G із відображенням фактичних значень щодо порогових (Таблиця 3.14). Уніфікована форма, сумісна з вимогами міжнародними стандартами вуглецевого коригування. Публікація звіту у відкритому доступі для стейкхолдерів, банків та державних органів. Автоматичне присвоєння ESG-рейтингу за результатами верифікованого паспорта.	Фінансовий директор, головний бухгалтер
5. Диференційовані рівні верифікації	Рівень А Базовий: внутрішня самодекларація для доступу до локальних інструментів підтримки. Рівень Б Високий: незалежний зовнішній аудит для отримання пільгового зеленого фінансування та виходу на експортні ринки.	Керівник для Рівня «А», незалежний аудитор для Рівня «Б»
6. Управлінське реагування на основі даних	Системне коригування виробничих процесів та інвестиційних планів на основі виявлених відхилень фактичного інтегрального індексу IIUE від стратегічних цілей компанії.	Власник бізнесу, рада директорів

Джерело: розроблено автором.

Логічним продовженням визначення складових елементів звітності є алгоритм їх практичного впровадження. Враховуючи стан обмежених ресурсів малих і середніх підприємств алюмінієвої галузі запропоновано спрощену процедуру моніторингу, звітування та верифікації - MRV [167]. Вона побудована таким чином, щоб не створювати зайвого навантаження на бізнес і водночас забезпечувати системну роботу з нефінансовими даними.

Перший етап - регулярний внутрішній моніторинг. На даному етапі не потрібно створювати відокремлені підрозділи чи залучати зовнішніх фахівців: відповідні функції можуть бути виконані наявними технічними спеціалістами, зокрема менеджером або головним інженером. На щомісячній основі дані з приладів обліку, виробничих журналів і закупівельних документів фіксуються відповідальними співробітниками та завантажуються до доступних цифрових інструментів. Це дозволяє без зайвих зусиль отримувати актуальні значення ключових показників і своєчасно реагувати на будь-які відхилення ще до того, як вони стають критичними.

Другий етап - щорічне ESG-Е-звітування, адаптоване до можливостей малого бізнесу. Щороку, до кінця першого кварталу, підприємство готує нефінансовий звіт у стандартизованому форматі й подає його через електронну платформу з підтвердженням електронним підписом. Принцип перевірки тут простий і логічний: якщо діяльність компанії на внутрішньому ринку - достатньо власної самодекларації; якщо ж вона планує виходити на ринок ЄС або укласти угоди з великими замовниками - тоді вже доведеться пройти незалежний аудит або отримати відповідну сертифікацію. Додатково система здатна самостійно виявляти підозрілі відхилення від середніх показників по галузі та сигналізувати про них без жодного ручного втручання.

Завершальний етап - оприлюднення узагальнених результатів. Запропонований інструмент призначений не для ранжування підприємств чи виставлення їм оцінок, а для надання кожному підприємству можливості зіставити власні показники із середньогалузевими без розкриття комерційної таємниці. За результатами оцінювання підприємство отримує аналітичний звіт, у якому чітко

ідентифіковано проблемні зони, зокрема факти надмірного споживання електроенергії, та визначено доступні інструменти фінансування для їх усунення.

Проте сама по собі MRV-процедура, хай яка добре продумана, не запрацює без відповідного інституційного середовища. Саме тому варто говорити не про ізольований механізм звітності, а про багаторівневу систему взаємодії - таку, що дає змогу реально використовувати зібрані дані, не перетворюючи звітність на черговий бюрократичний обов'язок для малого та середнього бізнесу. Як саме ця архітектура влаштована - показано в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16

Інституційна архітектура розподілу функцій у системі ESG-Е-звітності

Рівень управління	Відповідальний орган	Ключові функції
I Стратегічний	Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства України	Затвердження рамкових ESG-індикаторів та порогових значень (Таблиця 3.14), формування державної політики сталого розвитку промисловості, визначення інструментів підтримки залежно від ESG-рейтингу
II Операційний (промисловий)	Департамент промислової політики Міністерства економіки, довкілля та сільського господарства України	Адміністрування цифрової платформи ESG-звітності, агрегація та аналіз поданих ESG-паспортів, моніторинг відповідності галузевим KPI, автоматичне виявлення аномальних відхилень
III Операційний (енергетичний)	ДАЕЕ (Держенергоефективності)	Моніторинг енергетичних індикаторів (питоме енергоспоживання, частка відновлюваної енергії, частка енерговитрат у собівартості), методична підтримка у сфері енергоефективності та декарбонізації
IV Верифікації	Акредитовані аудитори, Держекоінспекція	Зовнішня незалежна верифікація не менше 20% ESG-даних, підтвердження достовірності поданих ESG-паспортів, присвоєння верифікаційного статусу
V Галузевий	Асоціація виробників алюмінію України	Розробка та оновлення галузевих бенчмарків, консультаційна та методична підтримка МСПП, організація навчання персоналу з питань ESG та MRV-процедур
VI Підприємство	Керівник МСПП, уповноважений ESG	Збір та подання верифікованого ESG-паспорта, внутрішній моніторинг KPI, самодекларація для внутрішнього ринку або замовлення зовнішнього аудиту для виходу на ринок ЄС

Джерело: розроблено автором.

Запропонована архітектура передбачає не лише розподіл функцій між учасниками, а й узгодження державного регулювання з галузевим самоврядуванням. Саме такий баланс створює умови для ефективної роботи

системи. Її перевагою є чіткий розподіл операційних повноважень. Департамент промислової політики Міністерства економіки, довкілля та сільського господарства України відповідає за адміністрування інтегрованої ESG-E-звітності та платформи подання даних. Натомість ДАЕЕ зосереджується на енергетичних індикаторах: питомому енергоспоживанні, частці відновлюваної енергії та енерговитратах у собівартості продукції. Такий розподіл є обґрунтованим, оскільки саме в цій сфері агентство має належну технічну експертизу та практичний досвід. Це дає змогу уникнути створення зайвих бюрократичних структур, дублювання функцій і додаткових бюджетних витрат.

Прозорість цієї системи забезпечується не декларативно, а через механізми верифікації даних. Для українських МСПП це має практичне значення, оскільки можливість підтвердження показників є однією з ключових умов участі у глобальних ланцюгах доданої вартості.

Важливим аспектом архітектури є можливість доступу до даних. Якщо узагальнені результати не будуть доступні публічно, система моніторингу фактично зведеться до внутрішньої звітності. Водночас малий і середній бізнес обґрунтовано прагне захистити інформацію, що може мати комерційну цінність. Тому доцільно застосовувати диференційований підхід до оприлюднення даних. Агреговані галузеві показники мають бути відкритими, тоді як чутлива інформація окремих підприємств - захищеною. Розмежування цих категорій даних і коло суб'єктів, які матимуть до них доступ, наведено в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17

Диференціація доступу до даних ESG-E-звітності

Характеристика	Публічні дані	Конфіденційні дані
Мета розкриття	Забезпечення прозорості для інвесторів, держави та громадськості	Захист конкурентних переваг та технологічних ноу-хау виробника
Рівень доступу	Відкритий: веб-портали, дашборди	Закритий: доступ мають лише верифікатори та ДАЕЕ
Об'єкт звітування	Агреговані та питомі показники ефективності	Первинні технологічні та фінансові дані
Приклади	Індекси ІІUE, ІESG-E; Питомі викиди CO ₂ на тонну; Частка утилізації відходів; Галузеві бенчмарки енергоспоживання	Точні рецептури сплавів; Перелік постачальників; Вартість контрактів; Технологічні режими плавки.

Джерело: розроблено автором.

Такий підхід дозволяє державі та інвесторам отримувати достовірну та зіставну картину ефективності підприємства - і при цьому не вимагати від нього розкриття того, що становить його комерційну таємницю.

Водночас варто визнати очевидне: впровадження ESG-E-звітності коштує ресурсів - часу, коштів і організаційних зусиль, яких у малого і середнього промислового підприємства апріорі небагато. Саме тому звітність сама по собі не може бути самоціллю - вона має супроводжуватися реальними економічними стимулами. Спираючись на досвід країн ЄС, а також на поточні потреби українських виробників, пропонується комплексний пакет інструментів підтримки, доступ до яких логічно пов'язати з наявністю верифікованого ESG-E-паспорта підприємства та досягненням порогових значень ключових показників ефективності.

У частині «зеленого» фінансування та технологічної модернізації орієнтиром слугує апробована практика країн ЄС. Йдеться передусім про пільгове кредитування або грантову підтримку для закупівлі енергоефективного обладнання - індукційних печей, рекуператорів, систем очищення, - де критерієм доступу є підтверджене звітністю скорочення викидів або зниження енергоємності виробництва. Окремим напрямом є державно-приватне партнерство для співфінансування відновлення зруйнованих війною виробничих потужностей - відповідно до принципу післякризової відбудови «краще, ніж було».

З огляду на високий рівень зношеності основних фондів і значне податкове навантаження, окремої уваги заслуговують фіскальні стимули. Тут доцільно розглядати два інструменти: прискорену амортизацію нового екологічного обладнання та податкові канікули за моделлю реінвестування. Останнє означає звільнення від оподаткування тієї частини прибутку, що спрямовується на модернізацію виробництва, підвищення енергоефективності або фінансування досліджень і розробок. Це не просто податкова пільга - це механізм, який робить технологічне оновлення фінансово вигідним навіть для невеликих підприємств.

Наскрізним принципом усієї системи стимулювання має бути пропорційність: обсяг державної підтримки зростає відповідно до рівня ESG-E-

відповідності підприємства. Такий підхід формує не разовий імпульс, а послідовну мотивацію до поступового покращення екологічних, соціальних та управлінських показників. Якщо ж КРІ падають нижче порогів поточного рівня - рейтинг знижується, а разом із ним скорочується і перелік доступних стимулів. Неподання ESG-Е-паспорта у встановлений строк означає виключення з системи оцінювання на один рік.

Для пом'якшення адаптаційного навантаження на підприємства, що лише розпочинають упровадження системи, передбачається «правило м'якого старту»: протягом перших двох років після запуску підприємства отримують інформаційну та консультаційну підтримку без жодних санкцій за недосягнення порогових значень. Це час, щоб розібратися, налаштувати процеси і зрозуміти логіку системи - а не боятися покарання.

Водночас система стимулів має свій зворотній бік: механізм відповідальності. Неподання ESG-Е-паспорта тягне за собою тимчасове виключення з програм підтримки. Подання недостовірних даних - позбавлення рейтингу на визначений період із поверненням раніше отриманих пільг, а систематичне погіршення показників без жодних коригувальних дій може стати підставою для направлення відповідної рекомендації Держекоінспекції щодо проведення перевірки. Це логічна умова довіри до всієї системи.

Коли державні установи використовують механізми зелених державних закупівель, продукція відповідальних виробників користується більшим попитом. Включення екологічних критеріїв у тендерні процедури означає надання переваги постачальникам із нижчим вуглецевим слідом та підтвердженням використання вторинної сировини. У контексті післявоєнної реконструкції цей інструмент набуває стратегічного значення: він не лише стимулює локальне імпортозаміщення та високий пріоритет національних постачальників в інфраструктурних проектах, але й пришвидшує формування замкнених циклів циркулярної економіки всередині країни, зменшуючи залежність від імпортних ресурсів та посилюючи стійкість ланцюгів постачань.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У розділі розроблено комплекс науково-методичних та прикладних засад забезпечення економічної ефективності малих і середніх промислових підприємств алюмінієвої галузі на засадах сталого розвитку. Запропонований інструментарій охоплює три взаємопов'язані рівні - від обґрунтування та вибору управлінських рішень, через моделювання структури матеріального потоку, до інституційно-регуляторного середовища, у якому ці рішення реалізуються. Такий підхід забезпечує наскрізний логічний перехід від оцінювання альтернатив на рівні окремого підприємства до загальногалузових механізмів державного стимулювання.

На рівні управлінських рішень здійснено порівняльний аналіз наявних підходів до забезпечення економічної ефективності та обґрунтовано доцільність інтегрального ESG-орієнтованого оцінювання з виокремленням економічної складової (Econ) в самостійний блок. Сформовано систему збалансованих стратегічних цілей МСПП у координатах ESG та економічної сталості, а також інтегральний індекс IESG-E як зважену суму нормалізованих критеріїв (Econ, E, S, G). Вагові коефіцієнти (0,40; 0,30; 0,15; 0,15) визначено методом експертних оцінок; узгодженість думок експертів підтверджено коефіцієнтом конкордації Кендалла, а стійкість ранжування - аналізом чутливості до помірних змін ваг. Запропоновано покрокову процедуру інтегрального оцінювання та ранжування альтернатив зі шкалою значень IESG-E для визначення їх пріоритетності, у якій вибір здійснюється не за принципом максимального індексу, а з обов'язковим урахуванням цілей і обмежень підприємства. Це робить підхід придатним для підтримки управлінських рішень в умовах обмежених ресурсів МСПП.

На рівні структури матеріального потоку розроблено інтегральний індекс утилізаційної ефективності (IIUE), який узагальнює внесок повторного використання, перероблення та енергетичного відновлення з урахуванням штрафу за безповоротні втрати. Економіко-математичне моделювання сценаріїв співвідношення первинного та вторинного алюмінію, виконане на фактичних даних реального підприємства галузі, засвідчило, що базове значення IIUE $\approx 0,215$

має істотний резерв зростання. Зокрема, перехід від міксу 40/60 до 20/80 (первинний/вторинний) знижує вуглецеву інтенсивність продукції з 5,10 до 2,80 тСО₂е/т і забезпечує економію вуглецевих платежів близько 115 тис. USD/рік за обсягу виробництва 1000 т/рік. Це підтверджує, що збільшення частки вторинної сировини одночасно підвищує циркулярність виробництва, знижує вуглецевий слід і покращує економічні результати діяльності підприємства.

На інституційно-регуляторному рівні обґрунтовано спрощену, адаптовану до ресурсних можливостей МСПП систему ESG-E-звітності на основі процедури моніторингу, звітування та верифікації (MRV), що передбачає регулярний внутрішній моніторинг, щорічне стандартизоване ESG-E-звітування з диференційованим режимом перевірки (самодекларація для внутрішнього ринку або незалежний аудит для виходу на ринок ЄС) та оприлюднення узагальнених результатів. Для практичної реалізації системи запропоновано інституційну архітектуру розподілу функцій між рівнями управління - від стратегічного (формування рамкових ESG-E-індикаторів та політики) до рівня підприємства, з узгодженням державного регулювання й галузевого самоврядування та чітким розмежуванням операційних повноважень. Окремо обґрунтовано диференційований підхід до доступу до даних, за якого агреговані галузеві показники є відкритими, а чутлива технологічна та фінансова інформація підприємств - захищеною, що відповідає інтересам МСПП у глобальних ланцюгах доданої вартості.

Розроблено розширену матрицю економічних та ESG-індикаторів із пороговими значеннями, а також пов'язаний з рівнем ESG-E-відповідності комплекс механізмів державного стимулювання: пільгове «зелене» фінансування та грантову підтримку модернізації, державно-приватне партнерство для післявоєнної відбудови потужностей, фіскальні стимули (прискорену амортизацію екологічного обладнання та податкові канікули за моделлю реінвестування), а також пріоритет у «зелених» державних закупівлях. Наскрізним принципом системи є пропорційність підтримки рівню ESG-E-відповідності, доповнена «правилом м'якого старту» для новачків та механізмом відповідальності за

неподання чи недостовірність даних. Інтегральні індекси IESG-E та ПУЕ використано як об'єктивні верифіковані критерії доступу до інструментів підтримки.

Сукупно запропоновані інструменти утворюють цілісну, багаторівневу та адаптовану до ресурсних обмежень МСПП систему забезпечення економічної ефективності на засадах сталого розвитку, придатну як для внутрішнього управлінського аудиту, так і для узгодження діяльності підприємств із регуляторними вимогами ЄС, зокрема механізмом СВМ. Розроблений інструментарій створює основу для подальших досліджень у напрямі його апробації на ширшій вибірці підприємств та поглиблення соціального блоку оцінювання.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено актуальне наукове завдання - розвинуто теоретико-методичні засади та розроблено прикладний інструментарій забезпечення економічної ефективності діяльності малих і середніх промислових підприємств на засадах сталого розвитку (на прикладі виробництва алюмінію). Проведене дослідження дало змогу сформулювати такі висновки.

1. Обґрунтовано, що для промислових енергоємних МСП економічна ефективність діяльності в контексті сталого розвитку потребує розширення традиційних підходів, які фокусуються на співвідношенні економічних результатів до витрачених на їх досягнення ресурсів. У зв'язку з цим поняття економічної ефективності енергоємних МСП визначено як інтегральну характеристику результативності господарської діяльності, що крім співвідношення економічних результатів (доходу, прибутку, доданої вартості) до витрачених на їх досягнення ресурсів, враховує дотримання екологічних обмежень (насамперед питома вуглецева інтенсивність, енергоємність плавлення, використання відновлюваних джерел енергії та вторинного металу, рівень циркулярності) і соціальної відповідальності (безпека праці, розвиток і навчання персоналу, стабільність зайнятості). Це відповідає сучасній парадигмі сталого розвитку та створює методологічну основу для розроблення системи критеріїв оцінювання економічної ефективності МСП з урахуванням особливостей їх економічної діяльності.

2. Удосконалено методичний підхід до оцінювання економічної ефективності МСП, що ґрунтується на авторській чотириблоковій системі критеріїв (економічних, екологічних, соціальних, управлінських) та комплексному поетапному оцінюванні з використанням багаторівневого агрегування (нормування часткових показників-стимуляторів і дестимуляторів; зведення у блокові індекси методом зваженої суми з ваговими коефіцієнтами за методом експертних оцінок; інтегральна таксономічна оцінка за методом Хельвіга) та індексу утилізаційної ефективності (ІІУЕ). Виокремлення в наведеному підході економічної складової в самостійний блок дає змогу краще враховувати особливості діяльності

енергоємних МСПП та можливості реалізації цілей і пріоритетів їх сталого розвитку.

3. Методичні засади оцінювання та прогнозування сталого розвитку зовнішнього середовища діяльності МСПП з виробництва алюмінію розвинено із застосуванням таксономічного аналізу (для визначення галузевих трендів та актуальних можливостей розвитку галузі) на основі обґрунтованих автором часткових аналітичних показників за ключовими вимірами сталого розвитку. Часткові показники доповнено за трьома вимірами: економічним (обсяг виробництва, продуктивність праці), екологічним (енергоємність виплавки, структура енергоспоживання за джерелами, викиди парникових газів сектору та інтенсивність викидів первинного алюмінію) і соціальним (відпрацьовані людино-години, коефіцієнти травматизму і обмеженої працездатності). Прогнозування галузевих тенденцій сталого розвитку з використанням ARIMA-моделювання дало змогу виявити тенденцію стабілізації викидів без суттєвого скорочення, що не відповідає цілям нетто-нульових викидів і актуалізує потребу в активних заходах із декарбонізації. Виявлені із застосуванням авторського підходу зміни та детермінанти розвитку галузі, що дали змогу прогнозувати збереження проблеми вуглецевого сліду, є важливими для визначення пріоритетних напрямів розробки рішень з підвищення економічної ефективності на засадах сталого розвитку відповідно до змін у зовнішньому середовищі діяльності МСПП.

4. З метою удосконалення процедури прийняття управлінських рішень щодо сталого розвитку МСПП розроблено діагностичний апарат багатокритеріального оцінювання альтернатив рішень. Його основою є ESG-підхід, доповнений і розвинений автором з урахуванням особливостей діяльності МСПП у алюмінієвій галузі. В системі критеріїв оцінювання виокремлено економічну складову (зокрема операційна рентабельність, собівартість продукції, продуктивність праці, частка енерговитрат у структурі собівартості та енерговартість продукції), та сформовано інтегральний індекс IESG-E, в якому вагомість факторів запропоновано встановлювати методом експертних оцінок. Для практичної імплементації розробки у діяльність МСПП визначено поетапну процедуру оцінювання й

ранжування альтернатив, що сприятиме підтримці управлінських рішень в умовах обмежених ресурсів МСПП. Удосконалений діагностичний апарат розширює можливості аналізу сталого розвитку підприємств на основі пріоритизації та обґрунтованого вибору альтернативних управлінських рішень з мінімальними витратами часу та ресурсів..

5. В умовах невизначеності підходів до забезпечення економічної ефективності діяльності МСПП алюмінієвої галузі на засадах енергоефективності та циркулярності виробництва, визначено, що ефективним способом досягнення цілей декарбонізації та рециклінгу є застосування кількісного оцінювання утилізаційної ефективності процесу виробництва алюмінію та сценарного моделювання структури алюмінієвого міксу. З цією метою запропоновано авторський індекс утилізаційної ефективності та апробовано сценарний підхід до моделювання структури сировини. Встановлено, що збільшення частки вторинного алюмінію сприяє одночасному підвищенню циркулярності виробництва, зниженню вуглецевої інтенсивності та покращенню економічних результатів діяльності підприємства. Запропонована модель оптимізації дозволяє підприємствам обирати найкращі альтернативи рішень за різних доступних поєднань вхідних умов та обмежень.

6. Обґрунтовано підходи до підтримки впровадження ESG-E-звітності МСПП з виробництва алюмінію для забезпечення економічної ефективності їх діяльності на засадах сталого розвитку. Сутність запропонованого підходу полягає спрощенні та адаптації до ресурсних обмежень МСПП ESG-звітності, яка функціонує на принципах моніторингу, звітування та верифікації (MRV) з диференційованим режимом перевірки даних (через механізми самодекларування для внутрішнього ринку або незалежного аудиту в разі виходу на ринки ЄС). Запропоновано авторську інституційну архітектуру розподілу функцій між рівнями управління та розмежування прав доступу до інформації. На відміну від наявних стандартів ESG-звітності, орієнтованих переважно на великі підприємства, обґрунтований підхід безпосередньо пов'язує комплекс інструментів державного стимулювання (пільгове «зелене» кредитування та грантову підтримку закупівлі

енергоефективного обладнання, прискорену амортизацію і податкові канікули за моделлю реінвестування прибутку, а також державно-приватне партнерство для відновлення зруйнованих виробничих потужностей) з фактичним рівнем ESG-відповідності суб'єктів господарювання. Застосування авторського підходу дозволить мінімізувати адміністративне й фінансове навантаження на МСПП, сприятиме збільшенню прозорості застосування інструментів державної підтримки, декарбонізації промислового сектору та створенню передумов для виконання вітчизняними підприємствами екологічних вимог міжнародного регуляторного середовища.

Сукупно одержані результати утворюють цілісну, багаторівневу та адаптовану до ресурсних обмежень МСПП систему забезпечення економічної ефективності на засадах сталого розвитку, придатну як для внутрішнього управлінського аудиту, так і для узгодження діяльності підприємств із регуляторними вимогами ЄС, зокрема механізмом СВМ. Перспективами подальших досліджень є апробація розробленого інструментарію на ширшій вибірці підприємств, поглиблення соціального блоку оцінювання та розвиток операційно-процесних моделей енергоефективності виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Carson R. Silent Spring. Boston : Houghton Mifflin Company, 1962. 368 p. URL: https://library.uniteddiversity.coop/More_Books_and_Reports/Silent_Spring-Rachel_Carson-1962.pdf (дата звернення: 19.08.2024).https://library.uniteddiversity.coop/More_Books_and_Reports/Silent_Spring-Rachel_Carson-1962.pdf
2. Commoner B. The Closing Circle: Nature, Man, and Technology. New York : Alfred A. Knopf, 1971. 326 p. URL: https://markstoll.net/HIST4323/2011/Commoner%3B_Closing_Circle_excerpt.pdf (дата звернення: 09.08.2024).
3. Suzuki D. David Suzuki: The Autobiography. Vancouver : Greystone Books, 2006. 405 p. URL: <https://books.google.ad/books?id=S3vIyltbdEQC> (дата звернення: 12.08.2025).
4. Brundtland Report. Federal Office for Spatial Development ARE. URL: https://www.are.admin.ch/are/en/home/sustainable-development/sustainability-policy/2030agenda/un-_milestones-in-sustainable-development/1987--brundtland-report.html (дата звернення: 26.08.2024).
5. Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens W. W. The Limits to Growth. New York : Universe Books, 1972. 205 p. URL: <https://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf> (дата звернення: 27.05.2025).
6. Elkington J. Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. Oxford : Capstone, 1997. 402 p. URL: <https://surl.li/tuzlop> (дата звернення: 09.04.2025).
7. Sachs J. D. The Age of Sustainable Development. New York : Columbia University Press, 2015. 544 p. URL: <https://cup.columbia.edu/book/the-age-of-sustainable-development/9780231173155/> (дата звернення: 20.07.2024).
8. Пікетті Т. Капітал у XXI столітті / пер. з фр. Київ : Наш формат, 2016. 696 с.

9. Berkes F., Folke C., Colding J. (eds.) Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience. Cambridge : Cambridge University Press, 2000. 476 p.
10. Hawken P. The Ecology of Commerce: A Declaration of Sustainability. New York : HarperCollins, 1993. 250 p. URL: <https://p2infohouse.org/ref/31/30233.pdf> (дата звернення: 15.08.2024).
11. Parson E. A., Haas P. M., Levy M. A. A summary of major documents signed at the Earth Summit and the Global Forum. Environment. 1992. Vol. 34, No. 4. P. 12-15, 34-36.
12. Данилишин Б. М. Природно-ресурсний потенціал сталого розвитку України. Київ : РВПС України НАН України, 1999. 716 с.
13. Трегобчук В. Концепція сталого розвитку для України. Вісник НАН України. 2002. № 2. С. 31-40. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2002_2_7 (дата звернення: 07.07.2024).
14. Основи стійкого розвитку : навч. посіб. / за ред. Л. Г. Мельника. Суми : Університетська книга, 2005. 654 с. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/44620> (дата звернення: 20.07.2025).
15. Дорогунцов С., Ральчук О. Сталий розвиток - цивілізаційний діалог природи і культури. Вісник НАН України. 2001. № 10. С. 17-21. URL: <https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/visnyk/article/view/1294> (дата звернення: 04.07.2024).<https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/visnyk/article/view/1294>
16. Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року : резолюція Генеральної Асамблеї ООН від 25 вересня 2015 р. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (дата звернення: 15.01.2025).
17. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy - a new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 143. P. 757-768. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
18. Womack J. P., Jones D. T. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. New York : Free Press, 2003. 396 p. DOI: 10.1038/sj.jors.2600967.

19. Chu S., Majumdar A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*. 2012. Vol. 488, No. 7411. P. 294-303. DOI: 10.1038/nature11475.
20. Gielen D., Boshell F., Saygin D., Bazilian M. D., Wagner N., Gorini R. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*. 2019. Vol. 24. P. 38-50. DOI: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
21. Bocken N. M. P., Short S. W., Rana P., Evans S. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 65. P. 42-56. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.11.039.
22. Zhang X., Davidson E. A., Mauzerall D. L., Searchinger T. D., Dumas P., Shen Y. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*. 2015. Vol. 528, No. 7580. P. 51-59. DOI: 10.1038/nature15743.
23. Ma Z., Cooper P., Daly D., Ledo L. Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 55. P. 889-902. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.08.018.
24. Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J. Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological Economics*. 2018. Vol. 143. P. 37-46. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041.
25. Murray A., Skene K., Haynes K. The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*. 2017. Vol. 140, No. 3. P. 369-380. DOI: 10.1007/s10551-015-2693-2.
26. Habert G., Miller S. A., John V. M., Provis J. L., Favier A., Horvath A., Scrivener K. L. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2020. Vol. 1, No. 11. P. 559-573. DOI: 10.1038/s43017-020-0093-3.
27. Lee C. C., Lee C. C. How does green finance affect green total factor productivity? Evidence from China. *Energy Economics*. 2022. Vol. 107. Article 105863. DOI: 10.1016/j.eneco.2022.105863.
28. Данилишин Б. М. Розроблення національних стратегій сталого розвитку: корисний досвід для України. *Механізм регулювання економіки*. 2008. № 3(2). С. 214-218.

29. Андрійчук В. Г. Ефективність діяльності аграрних підприємств: теорія, методика, аналіз : монографія. Київ : КНЕУ, 2005. 292 с.
30. Camanho A. S., Silva M. C., Piran F. S., Lacerda D. P. A literature review of economic efficiency assessments using Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*. 2024. Vol. 315. P. 1-18. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.07.027.
31. Kalirajan K. P. On measuring economic efficiency. *Journal of Applied Econometrics*. 1990. Vol. 5, No. 1. P. 75-85.
32. Mishan E. J. *Economic Efficiency and Social Welfare: Selected Essays on Fundamental Aspects of the Economic Theory of Social Welfare*. London : George Allen & Unwin, 1981. 312 p.
33. Трусова Н. В., Присяжнюк Н. М., Федорук Ю. В., Федорук Н. М., Ткаченко О. В. Теоретичні підходи до розуміння категорії «економічна ефективність». *Ефективна економіка*. 2023. № 12. DOI: 10.32702/2307-2105.2023.12.8.
34. Баглаєва Н. С., Суховєєва Ю. А. Теоретична сутність поняття економічна ефективність діяльності підприємства. *Вісник СНТ ННІ бізнесу і менеджменту ХНТУСГ*. 2020. Вип. 2. С. 98-101.
35. Батракова Т. І. Сутність поняття «економічна ефективність» діяльності підприємства в ринкових умовах. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія : Економічні науки*. 2015. № 1(1). С. 172-178.
36. Демченко А. О., Момот О. І. Присутність понять «ефективність» та «результативність» в економіці. *Економічний вісник Донбасу*. 2013. № 3(33). С. 207-210.
37. Ємець Ю. Г. Економічна ефективність як основа конкурентоспроможності підприємства. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*. 2013. № 769. С. 156-160.
38. Петков О. І. Економічна ефективність підприємств та фактори впливу на неї. *Український журнал прикладної економіки*. 2021. Т. 6, № 1. С. 392-399. DOI: 10.36887/2415-8453-2021-1-47.

39. Janovská K., Vilamová Š., Besta P., Samolejová A., Švecová E., Vozňáková I. Analysis of energy demandingness of metallurgical production. *Metalurgija*. 2012. Vol. 51, No. 2. P. 277-279.
40. Ghisetti C., Rennings K. Environmental innovations and profitability: how does it pay to be green? An empirical analysis on the German innovation survey. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 75. P. 106-117.
41. Schulze M., Nehler H., Ottosson M., Thollander P. Energy management in industry: a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112. P. 3692-3708.
42. Paulus M., Borggreffe F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. *Applied Energy*. 2011. Vol. 88, No. 2. P. 432-441.
43. Benedetti M., Cesarotti V., Introna V., Serranti J. Energy consumption control automation using artificial neural networks and adaptive algorithms: proposal of a new methodology and case study. *Applied Energy*. 2016. Vol. 165. P. 60-71.
44. Liu G., Müller D. B. Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 35. P. 108-117.
45. Jonsson P., Lesshammar M. Evaluation and improvement of manufacturing performance measurement systems - the role of OEE. *International Journal of Operations & Production Management*. 1999. Vol. 19, No. 1. P. 55-78.
46. Даценко А. Вплив «СВАМ» на розвиток та конкурентоспроможність металургійної галузі України. *Економіка та суспільство*. 2024. № 70. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-70-99.
47. Das T. Ch., Bora P. K., Das J. Corporate sustainability, ESG, and the Triple Bottom Line: a review of key challenges. *International Review of Management and Marketing*. 2025. Vol. 15, No. 5. P. 345-355. DOI: 10.32479/irmm.19768.
48. Стандарти звітності зі сталого розвитку: ESRS або GRI - який обрати в Україні. BDO. URL: <https://www.bdo.ua/uk-ua/insights-2/information-materials/2025/which-to-use-in-ukraine-esrs-or-gri> (дата звернення: 23.09.2025).

49. ISO 14064-1:2018. Greenhouse gases. Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. Geneva : ISO, 2018.
50. ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. Geneva : ISO, 2006.
51. ISO 50001:2018. Energy management systems. Requirements with guidance for use. Geneva : ISO, 2018.
52. European Green Deal. European Commission. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (дата звернення: 15.10.2025).
53. Руденко М. Р. Теорія та технологія процесів підготовки сировини до плавки. Кам'янське : Дніпровський державний технічний університет, 2019. С. 44.
54. Горбунов О. Д. Конспект лекцій з дисципліни «Сучасні маловідходні технології». Кам'янське : Дніпровський державний технічний університет, 2016. С. 60.
55. Capuzzi S., Timelli G. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: a review. *Metals*. 2018. Vol. 8, No. 4. Article 249.
56. Al-Alimi S., Yusuf N. K., Ghaleb A. M. et al. Recycling aluminium for sustainable development: a review of different processing technologies in green manufacturing. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 23. Article 102566. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102566.
57. Carvalho L. S. et al. The use of circular economy indicators to improve sustainability in the recycling aluminium context. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. 2021. P. 1-12.
58. Amponsah-Tawiah K., Jain A., Leka S., Hollis D., Cox T. Examining psychosocial and physical hazards in the Ghanaian mining industry and their implications for employees' safety experience. *Journal of Safety Research*. 2013. Vol. 45. P. 75-84.
59. Heinrich H. W. *Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach*. 4th ed. New York : McGraw-Hill, 1959.

60. Adair J. G. The Hawthorne effect: a reconsideration of the methodological artifact. *Journal of Applied Psychology*. 1984. Vol. 78. P. 413-432.
61. Toyota Production System. Toyota Global. URL: <https://global.toyota/en/company/vision-and-philosophy/production-system/> (дата звернення: 03.09.2024).
62. Liker J. K. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2021.
63. Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris, 2015. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (дата звернення: 13.11.2024).
64. Net Zero Coalition. United Nations. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition> (дата звернення: 19.12.2024).
65. International Energy Agency. *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris : IEA, 2021. 224 p.
66. van Soest H. L. et al. Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement. *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. Article 2140. DOI: 10.1038/s41467-021-22294-x.
67. 2050 Long-Term Strategy. European Commission, Climate Action. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en (дата звернення: 31.05.2024).
68. Dardor D., Flórez-Orrego D., Germanier R., Margni M., Maréchal F. Decarbonizing the aluminium industry: a comprehensive review of pathways and process integration perspectives. *Energy Strategy Reviews*. 2025. Vol. 61. Article 101853. DOI: 10.1016/j.esr.2025.101853.
69. Ge C., Liu S., Jiang K., Yang S., Liu C., Huang M., Bao S. Strategic decarbonization of aluminium value chains: a life cycle assessment review for sustainable transition pathways. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2026. Vol. 226. Article 116478. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116351.
70. The decarbonisation pathway of the aluminium industry - synergy of technology, recycling, and renewable energy. AlCircle. URL: <https://www.alcircle.com/news/the->

decarbonisation-pathway-of-the-aluminium-industry-117791 (дата звернення: 10.08.2025).

71. Net-Zero by 2050: Science-based Decarbonisation Pathways for the European Aluminium Industry. Brussels : European Aluminium, 2023.

72. Декарбонізація української енергетики (економіки): вплив російської агресії. Київ : Центр Разумкова, 2022. 96 с.

73. Kesicki F., Ekins P. Marginal abatement cost curves: a call for caution. Climate Policy. 2012. Vol. 12, No. 2. P. 219-236. DOI: 10.1080/14693062.2011.582347.

74. Український зелений курс: декарбонізація або смерть. Економічна правда. URL: <https://epravda.com.ua/projects/ekopromyslovist/2020/12/16/668493/> (дата звернення: 29.10.2025).

75. Тригуба В. Ю. Прогнозування викидів CO₂ у алюмінієвому секторі за допомогою моделі ARIMA: аналіз ефективності та перспективи декарбонізації. Вісник НУВГП. Серія «Економічні науки». 2025. Вип. 1(109). С. 173-185. DOI: 10.31713/ve1202516.

76. Тригуба В. Ю. Можливості застосування методів операційного менеджменту у забезпеченні стійкого економічного розвитку ливарних підприємств. Вісник НУВГП. Серія «Економічні науки». 2023. Вип. 3(103). С. 287-300. DOI: 10.31713/ve3202327.

77. Міщук Г., Тригуба В. Інтегральне оцінювання та вибір альтернатив розвитку МСПП на основі ESG-підходу. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2026. № 2. С. 371-376. DOI: 10.31891/2307-5740-2026-352-49.

78. International Aluminium Institute. URL: <https://international-aluminium.org/> (дата звернення: 23.04.2025).

79. International Energy Agency. Aluminium. Paris : IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/energy-system/industry/aluminium> (дата звернення: 06.11.2025).

80. World Steel Association. Sustainability Indicators. Brussels : worldsteel, 2024. URL: <https://worldsteel.org/> (дата звернення: 25.06.2025).

81. Global Cement and Concrete Association. Concrete Future: GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. London : GCCA, 2021.

82. Hellwig Z. Zastosowanie metody taksonomicznej do typologicznego podziału krajów ze względu na poziom ich rozwoju oraz zasoby i strukturę wykwalifikowanych kadr. *Przegląd Statystyczny*. 1968. T. 15, № 4. S. 307-326.
83. Jędrzejczak-Gas J., Barska A., Wyrwa J. Economic development of the European Union in the relation of sustainable development - taxonomic analysis. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 22. Article 7488. DOI: 10.3390/en14227488.
84. Debbarma J., Choi Y. A taxonomy of green governance: a qualitative and quantitative analysis towards sustainable development. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 79. Article 103693. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103693.
85. Czech A. Taxonomic measure of sustainable development of transport in Poland. *Ekonomia i Środowisko*. 2018. № 4(67). S. 8-20.
86. Chudy-Laskowska K. The level of development of wind energy in the EU countries - taxonomic analysis. *Energies*. 2022. Vol. 15. DOI: 10.3390/en15124415.
87. Cheba K., Bąk I. Sustainable development of the European Union countries - a taxonomic analysis. *Economics and Environment*. 2021. № 3(78). S. 76-91.
88. Haraldsson J., Johansson M. T. Energy efficiency in the supply chains of the aluminium industry: the cases of three production plants. *Energy Efficiency*. 2020. Vol. 13. P. 1543-1559. DOI: 10.1007/s12053-020-09893-1.
89. Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised Edition. Washington : World Resources Institute, WBCSD, 2015.
90. Hasanov R., Safarov J., Safarli A. Analyzing and forecasting CO₂ emissions in the aluminum sector using ARIMA model. *AGORA International Journal of Economical Sciences*. 2024. Vol. 18, No. 1. P. 55-64.
91. Box G. E. P., Jenkins G. M. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco : Holden-Day, 1970. 553 p.
92. Friede G., Busch T., Bassen A. ESG and financial performance: aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*. 2015. Vol. 5, No. 4. P. 210-233. DOI: 10.1080/20430795.2015.1118917.
93. Berg F., Kölbel J. F., Rigobon R. Aggregate confusion: the divergence of ESG ratings. *Review of Finance*. 2022. Vol. 26, No. 6. P. 1315-1344. DOI: 10.1093/rof/rfac033.

94. Gillan S. L., Koch A., Starks L. T. Firms and social responsibility: a review of ESG and CSR research in corporate finance. *Journal of Corporate Finance*. 2021. Vol. 66. Article 101889. DOI: 10.1016/j.jcorpfin.2021.101889.
95. European Aluminium (EAA). The European aluminium industry's Sustainability Roadmap Towards 2025. URL: https://european-aluminium.eu/news_events/the-european-aluminium-industrys-sustainability-roadmap-towards-2025/ (дата звернення: 24.02.2026).
96. Lepoutre J., Heene A. Investigating the impact of firm size on small business social responsibility: a critical review. *Journal of Business Ethics*. 2006. Vol. 67, No. 3. P. 257-273. DOI: 10.1007/s10551-006-9183-5.
97. Battaglia M., Testa F., Bianchi L., Iraldo F., Frey M. Corporate social responsibility and competitiveness within SMEs of the fashion industry: evidence from Italy and France. *Sustainability*. 2014. Vol. 6, No. 2. P. 872-893. DOI: 10.3390/su6020872.
98. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338-353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
99. Zavadskas E. K., Turskis Z., Kildienė S. State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*. 2014. Vol. 20, No. 1. P. 165-179. DOI: 10.3846/20294913.2014.892037.
100. Li Q., Tang W., Li Z. ESG systems and financial performance in industries with significant environmental impact: a comprehensive analysis. *Frontiers in Sustainability*. 2024. Vol. 5. Article 1454822. DOI: 10.3389/frsus.2024.1454822.
101. Hassani B. K., Bahini Y. Relationships between ESG disclosure and economic growth: a critical review. *Journal of Risk and Financial Management*. 2022. Vol. 15, No. 11. Article 538. DOI: 10.3390/jrfm15110538.
102. Shmelev S. E., Gilardi E. Corporate environmental, social, and governance performance: the impacts on financial returns, business model innovation, and social transformation. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 3. Article 1286. DOI: 10.3390/su17031286.
103. Le L. T. Impact of environmental, social and governance practices on financial performance: evidence from listed companies in Southeast Asia. *Cogent Business &*

Management. 2024. Vol. 11, No. 1. Article 2379568. DOI: 10.1080/23311975.2024.2379568.

104. Detthamrong U., Klangbunrueang R., Chansanam W., Dasri R. The impact of ESG performance on financial performance: evidence from listed companies in Thailand. *Forecasting*. 2026. Vol. 8, No. 1. Article 14. DOI: 10.3390/forecast8010014.

105. Lou J., Lei M., Wang S., Wei C., Du X., Hu J., Lian Y., Jiang X., Luo C. Spatio-temporal variations and disparities of China's aluminum supply through a gravity-decomposition approach. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 41244. DOI: 10.1038/s41598-025-25124-y.

106. Амоша О. І., Вишневський В. П., Ляшенко В. І., Харазішвілі Ю. М. та ін. Індустрія 4.0: напрями залучення інвестицій з урахуванням інтересів вітчизняних виробників. *Економічний вісник Донбасу*. 2019. № 3(57). С. 189-216. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/274378ae-b171-49f8-b839-bb5726d2cb56/content> (дата звернення: 10.02.2026).

107. Дейнеко Л. В., Кушніренко О. М., Ципліцька О. О. та ін. Промисловість України перед викликами майбутнього: у пошуках відповідей та рішень : колективна монографія / за ред. Л. В. Дейнеко ; НАН України, ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України». Київ, 2022. 346 с. URL: <https://www.researchgate.net/publication/365801826> (дата звернення: 06.03.2026).

108. Aluminium Stewardship Initiative (ASI). ASI Performance Standard V3. ASI, 2022. 58 p.

109. Žižović M. M., Damljanović N., Žižović M. R. Multi-criteria decision making method for models with the dominant criterion. *Filomat*. 2017. Vol. 31, No. 10. P. 2981-2989.

110. Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020. *Official Journal of the European Union*. 2024. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj/eng> (дата звернення: 02.01.2026).

111. European Commission. Joint Communication to the European Parliament, the European Council and the Council on European Economic Security Strategy. Brussels, 20.06.2023. JOIN (2023) 20 final. URL: <https://surl.li/nqsmly> (дата звернення: 20.05.2024).
112. International Aluminium Institute (IAI). Aluminium Sector Greenhouse Gas Pathways to 2050. London : IAI, 2021 (updated 2024). 48 p. URL: <https://surl.li/yedryl> (дата звернення: 10.09.2024).
113. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. Official Journal of the European Union. 2023. L 130, 16.05.2023. P. 52-104. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj/eng> (дата звернення: 27.03.2025).
114. ISO 14001:2015. Environmental management systems. Requirements with guidance for use. Geneva : ISO, 2015.
115. Зовнішня торгівля України товарами та послугами у 2017-2021 роках : статистичний збірник / Державна служба статистики України. Київ, 2022. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 22.10.2024).
116. Ansoff H. I. Corporate Strategy: An Analytic Approach to Business Policy for Growth and Expansion. New York : McGraw-Hill, 1965. 241 p.
117. Drucker P. F. Management: Tasks, Responsibilities, Practices. New York : Harper & Row, 1973. 839 p.
118. Герасимчук З. В., Поліщук В. Г. Стимулювання сталого розвитку регіону: теорія, методологія, практика : монографія. Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2011. 516 с.
119. Cheng Jin. Investigating the intersection of ESG investing, green recovery, and SME development in the OECD. Humanities and Social Sciences Communications. 2025. Vol. 12. Article 572. DOI: 10.1057/s41599-025-04873-1.
120. Тенденції алюмінієвої промисловості 2025 року: сталий розвиток, інновації та глобальна співпраця стимулюють зростання. URL: <https://surl.li/awgyri> (дата звернення: 17.01.2026).

121. Вимоги ESG роблять металургію більш стійкою, стверджує галузь. URL: <https://aclima.eus/en/noticia/esg-requirements-are-making-metals-more-sustainable-industry-says/> (дата звернення: 02.09.2024).
122. Майклс К. С., Марешаль Л., Кац Б. Чому ESG такий важливий для критично важливих мінеральних ресурсів, і що ми можемо з цим зробити? URL: <https://www.iea.org/commentaries/why-is-esg-so-important-to-critical-mineral-supplies-and-what-can-we-do-about-it> (дата звернення: 27.03.2026).
123. Дей А. Забезпечення майбутнього: екологічна та соціальна стійкість у гірничодобувному секторі України. *Regard sur l'Est*. 2025. DOI: 10.5281/zenodo.17457082.
124. Yi X., Lu Y., He G. Aluminum demand and low carbon development scenarios for major countries by 2050. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 475. Article 143647.
125. WEF. Net-Zero Industry Tracker 2024. URL: <https://www.weforum.org/publications/net-zero-industry-tracker-2024/> (дата звернення: 12.01.2026).
126. WEF. Net-Zero Industry Tracker 2024. Aluminium. URL: <https://www.weforum.org/publications/net-zero-industry-tracker-2024/aluminium-industry-net-zero-tracker-2024/> (дата звернення: 17.02.2026).
127. Bandpey A. F., Rahimpour S., Fuentes M., Kraslawski A. Unequal transitions: social progress and decarbonization contradictions across 160 countries. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 1003. Article 180638.
128. Becerril Torres O. U., Becerril-Tinoco C. A., Wieloch J., Munguía Vázquez G. Does economic growth influence the reduction of carbon dioxide emissions? Evidence for the United States-Mexico-Canada agreement. *Economics and Sociology*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 27-46. DOI: 10.14254/2071-789X.2025/18-1/2.
129. Mishchuk H., Tryhuba V. From energy intensity to sustainability: an analysis of trends in the aluminium industry. *Management/Vadyba*. 2024. Vol. 40, No. 2. P. 51-56.
130. Pinczynski M., Kasperowicz R., Azzopardi B., Bilan Y., Štreimikienė D. Malta's low carbon transition towards sustainability. *Sustainable Development*. 2024. Vol. 32, No. 5. P. 5120-5128. DOI: 10.1002/sd.2967.

131. Štreimikienė D. Renewable energy penetration in Nordic and Baltic countries of the EU. *Journal of International Studies*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 97-107. DOI: 10.14254/2071-8330.2024/17-1/6.
132. Vasylieva T., Derkacz A., Popp J., Horsch A. From energy dependency to energy security: how the war in Ukraine accelerated renewable deployment in Europe. *Economics and Sociology*. 2025. Vol. 18, No. 3. P. 229-253. DOI: 10.14254/2071-789X.2025/18-3/13.
133. Juracka A., Valaskova K. Progress towards sustainable activities: principal component analysis (PCA) of SMEs in the European Union. *Journal of International Studies*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 9-26. DOI: 10.14254/2071-8330.2025/18-2/1.
134. Bandpey A. F., Rahimpour S., Kraslawski A. Mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions aligned with global energy transition: scenarios of elements use. *Sustainable Production and Consumption*. 2024. Vol. 51. P. 345-358.
135. Ndiaye A. Building a circular economy: the strategic role of technology. *Aluminium International Today*. 2024. Vol. 37, No. 5. P. 74-75.
136. Ma L., Wong C. J., Bao J., Skyllas-Kazacos M., Shi J., Ahli N. et al. Estimation of the spatial alumina concentration of an aluminium smelting cell using a Huber function-based Kalman filter. *TMS Annual Meeting & Exhibition*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. P. 464-473.
137. Lian X., Gao H., Shen L., Yu Y., Wang Y., Peng Z. Life cycle assessment of primary aluminum production. *Processes*. 2025. Vol. 13, No. 2. Article 419. DOI: 10.3390/pr13020419.
138. Billy R. G., Müller D. B. Aluminium use in passenger cars poses systemic challenges for recycling and GHG emissions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023. Vol. 190. Article 106827.
139. Kharazishvili Y., Bilan Y., Sukhodolia O., Grishnova O., Mishchuk H. Scientific and strategic foresighting: the trajectory of sustainable development (on the example of Ukraine's energy security). *Sustainable Futures*. 2025. Vol. 9. Article 100580. DOI: 10.1016/j.sftr.2025.100580.

140. Vasa L., Kubatko O., Sotnyk I., Piven V., Trypolska G., Pysmenna U. Economic and environmental drivers of renewable energy transition in the EU. *Environmental Economics*. 2024. Vol. 15, No. 2. P. 232. DOI: 10.21511/ee.15(2).2024.16.
141. Tóth Á., Suta A., Szauter F., Lukács E. Quantitative analysis of green investments in European automotive companies: a digital reporting analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2024. P. 1-13.
142. Sun X., Van Fan Y., Lei Y., Si C., Cao Z., Varbanov P. S. Mechanism of environmental regulation on energy productivity, energy structure, and carbon emissions: the role of directed technological progress. *Energy*. 2025. Article 136651.
143. International Aluminium Institute (IAI). Aluminium Sector Life Cycle Inventory and GHG Pathways. London : IAI, 2023. URL: <https://international-aluminium.org/> (дата звернення: 26.03.2026).
144. European Aluminium (EAA). Environmental Profile Report. Brussels : European Aluminium, 2018. URL: <https://european-aluminium.eu/> (дата звернення: 22.02.2026).
145. Damodaran A. Margins by Sector (US). NYU Stern School of Business, 2024. URL: <https://surl.li/jvsohh> (дата звернення: 05.02.2026).
146. World Economic Forum. Net-Zero Industry Tracker 2023: Aluminium Industry. URL: <https://surl.li/sjqyot> (дата звернення: 07.08.2025).
147. European Aluminium Association. Official website. URL: <https://european-aluminium.eu/> (дата звернення: 27.06.2025).
148. Укрінформ. Рада ухвалила закон про зелену модернізацію промислових підприємств. URL: <https://surl.li/cs JFKQ> (дата звернення: 09.01.2026).
149. ZN.UA. CEO «Метінвесту»: головними викликами для металургії є тарифи держмонополій та екологічна політика. URL: <https://surl.li/ereobx> (дата звернення: 13.02.2026).
150. Про основні засади державного нагляду (контролю) у сфері господарської діяльності : Закон України № 877-V від 05.04.2007. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/877-16#Text> (дата звернення: 27.02.2026).

151. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України № 1264-XII від 25.06.1991. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (дата звернення: 29.03.2026).
152. Податковий кодекс України : Закон України № 2755-VI від 02.12.2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17> (дата звернення: 04.01.2026).
153. Про бухгалтерський облік та фінансову звітність в Україні : Закон України № 996-XIV від 16.07.1999. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/996-14#Text> (дата звернення: 03.03.2026).
154. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України : Закон України № 4618-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4618-17#Text> (дата звернення: 05.03.2026).
155. Global Reporting Initiative. GRI Standards. URL: <https://www.globalreporting.org/standards/> (дата звернення: 05.03.2026).
156. МСФЗ S1 «Загальні вимоги до розкриття фінансової інформації, пов'язаної зі сталим розвитком». URL: <https://www.ifrs.org/issued-standards/ifrs-sustainability-standards-navigator/ifrs-s1-general-requirements/> (дата звернення: 31.01.2026).
157. Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD). URL: <https://www.fsb-tcfd.org> (дата звернення: 31.03.2026).
158. Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised Edition. URL: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf> (дата звернення: 25.03.2026).
159. Свідерська І. М., Стегайло В. А. ESG-критерії у процесі прийняття стратегічних фінансових рішень: контролінгова перспектива. Актуальні проблеми економіки. 2025. № 9(291). С. 231-240. DOI: 10.32752/1993-6788-2025-1-291-231-240.
160. Таранець К., Потапова В., Пинзеник В. Підходи і принципи розробки і впровадження ESG-стратегії в українських банках. EY Sustainable Business Forum, 17 жовтня 2024 р. URL: <https://surl.li/qadhao> (дата звернення: 05.03.2026).

161. Кіржецька М., Кіржецький Ю. ESG-критерії в системі стратегічного контролінгу бізнесу. Галицький економічний вісник. 2025. № 1(92). С. 28-33. DOI: 10.33108/galicianvisnyk_tntu2025.01.028.
162. Мельник Л., Ремсеї Ш., Кубатко О., Калініченко Л. Industry 5.0 as a human-centric direction for social and labor entities transformations. Problems and Perspectives in Management. 2025. Vol. 23, No. 4. P. 290-300. DOI: 10.21511/ppm.23(4).2025.21.
163. Rame R., Purwanto P., Sudarno S. Industry 5.0 and sustainability: an overview of emerging trends and challenges for a green future. Innovation and Green Development. 2024. Vol. 3, No. 4. Article 100173.
164. Teusch J. et al. Carbon prices, emissions and international trade in sectors at risk of carbon leakage: evidence from 140 countries. OECD Economics Department Working Papers, No. 1813. Paris : OECD Publishing, 2024. DOI: 10.1787/116248f5-en. (дата звернення: 30.03.2026).
165. European Environment Agency. Monitoring, Reporting and Verification (MRV) in EU Emissions Trading System. URL: <https://surl.li/zddmaz> (дата звернення: 25.03.2026).
166. Haraldsson J., Jonsson S., Thollander P., Wallén M. Таксономія, потенціал економії та ключові показники ефективності кінцевого споживання енергії та викидів парникових газів в алюмінієвій промисловості та ливарних цехах алюмінію. Energies. 2021. Vol. 14, No. 12. Article 3571. DOI: 10.3390/en14123571.
167. Davila R. M. F., Schwarck F., Davel L., Pelken A. Digital twin for sustainability: a tool for the manufacturing industry. Procedia CIRP. 2023. Vol. 116. P. 143-148. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.025.
168. Chofreh A. G., Goni F. A., Klemeš J. J. Sustainable enterprise resource planning systems implementation: a framework development. Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 198. P. 1345-1354. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.096.
169. Break Even Analysis: How to Determine Your Break Even Point and Profit Margin. FasterCapital. Updated April 10, 2025. URL: <https://surl.li/emvoys> (дата звернення: 10.03.2026).

170. Aluminum in the Energy Paradigm Shift: The Industrial Logic Behind Rising Price Volatility. Alu-Disc. URL: <https://surl.lt/saojmm> (дата звернення: 11.01.2026).
171. Power Costs in the Production of Primary Aluminum. Aluminum-Products. URL: <https://www.aluminum-products.com/bar/2021-3914/> (дата звернення: 16.02.2026).
172. As well as aluminium recycling, saving 95% of the energy needed for primary aluminium production, the recycling process saves a similar percentage in greenhouse gas emissions. International Aluminium Institute. URL: <https://surl.li/rthwrl> (дата звернення: 28.02.2026).
173. Рада ЄС. Стала упаковка: Рада схвалила нові правила для зменшення кількості відходів та збільшення повторного використання в ЄС : пресреліз, 16 грудня 2024 р. URL: <https://surl.li/ezfupi> (дата звернення: 13.01.2026).
174. ISO. Circular economy. Measuring and assessing circularity performance. URL: <https://www.iso.org/sectors/environment/circular-economy> (дата звернення: 11.02.2026).
175. Eurostat. Коефіцієнт використання циркулярних матеріалів за типом матеріалу (env_ac_curm). URL: <https://surl.li/miynrm> (дата звернення: 27.03.2026).
176. World Steel Association. Safety and Health in the Steel Industry Data Report 2024. URL: <https://surl.li/zegbhhk> (дата звернення: 03.01.2026).
177. Zahidi S. et al. Future of Jobs Report 2023. World Economic Forum, 2023.
178. Segal M. 75% of Companies Not Ready for Pending ESG Data Assurance Requirements: KPMG Survey. ESG Today, 02.10.2023. URL: <https://surl.li/atefue> (дата звернення: 22.02.2026).
179. Eurostat. How digitalised are the EU's enterprises? 26.08.2022. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220826-1> (дата звернення: 29.01.2026).
180. Hexagon. Statistics: Digital twins for manufacturing. URL: <https://surl.li/yfxsxv> (дата звернення: 23.03.2026).
181. Bristol H. et al. AI has brought the Fourth Industrial Revolution to an inflection point, and manufacturers must choose a path forward: innovate, accelerate, or follow fast. McKinsey & Company. URL: <https://surl.li/ummnsww> (дата звернення: 13.03.2026).

182. Summers H., Kuk K., Newbury R., Yao E. Incentives on responsible business practices and sustainability remain as ESG reframing continues: results from the WTW 2025 ESG Incentive Metrics study. Executive Pay Matters Asia Pacific, 07.01.2026. URL: <https://surl.li/zeagcq> (дата звернення: 02.02.2026).
183. State Statistics Service of Ukraine. Ціль 8: Гідна праця та економічне зростання. Показник 8.2.2. Індекс продуктивності праці. URL: <https://sdg.ukrstat.gov.ua/uk/8-2-2/> (дата звернення: 02.01.2026).
184. Гулик Т. В., Міхеєва А. М. Зниження собівартості продукції як чинник підвищення ефективності роботи підприємства. Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. 2019. № 40(9). DOI: 10.32841/2413-2675/2019-40-9.
185. GHG Protocol. Scope 2 Guidance: An Amendment to the GHG Protocol Corporate Standard. Geneva : WRI, WBCSD, 2015. URL: <https://ghgprotocol.org/> (дата звернення: 08.12.2024).
186. European Aluminium. Circular Aluminium Action Plan. Brussels : European Aluminium, 2020. URL: <https://european-aluminium.eu/> (дата звернення: 25.07.2025).
187. U.S. Department of Energy (DOE). Energy and Environmental Profile of the U.S. Aluminum Industry. Washington : DOE, 2003. URL: <https://www.energy.gov/> (дата звернення: 16.03.2026).
188. SMS group. Energy efficiency solutions for aluminium extrusion plants : technical brochure. Düsseldorf : SMS group. URL: <https://www.sms-group.com/> (дата звернення: 18.05.2025).
189. Aluminium Extruders Council (AEC). Technical papers and resources on aluminium extrusion. Arlington Heights : AEC. URL: <https://www.aec.org/> (дата звернення: 05.05.2024).
190. United Nations. The Sustainable Development Goals: Goals and Targets. New York : United Nations, 2015-2025. URL: <https://sdgs.un.org/goals> (дата звернення: 20.01.2025).
191. International Aluminium Institute (IAI). Life Cycle Inventory (LCI) of the Global Aluminium Industry: 2022/2023 Update. London : IAI, 2023. URL: <https://international-aluminium.org/> (дата звернення: 27.04.2025).

192. Перероблення алюмінію в Україні: кейси сталого розвитку членів Асоціації «УкрАлюміній». UkrAluminium. 2025. URL: <https://alufoil.ua/project/aluminum-recycling-in-ukraine/> (дата звернення: 23.03.2026).
193. Зінченко С. Чому в Україні падає заготівля брухту: ключові чинники. GMK Center. 2025. URL: <https://gmk.center/ua/opinion/chomu-v-ukraini-padaie-zagotivlia-bruhtu-klyuchovi-chynnyky/> (дата звернення: 23.03.2026).

ДОДАТКИ

Розрахунковий апарат системи критеріїв оцінювання економічної ефективності МСПП (склад КРІ та формули)

У додатку наведено деталізований склад ключових показників ефективності (КРІ) у межах чотирьох блоків критеріїв системи оцінювання економічної ефективності МСПП на засадах сталого розвитку (підрозділ 1.2), формули їх розрахунку та орієнтовні цільові значення. Структура додатку відповідає чотириблоковій системі критеріїв (Econ, E, S, G), узагальненій у табл. 1.7. Наведені цільові орієнтири мають характер еталонних значень і підлягають уточненню залежно від специфіки конкретного підприємства та оновлення галузевих даних.

Таблиця А.1

Економічні критерії (Econ)

Критерій	КРІ	Одиниця	Орієнтир	Джерело/стандарт
Рентабельність	Рентабельність діяльності	%	зростання	Фінансовий облік
Собівартість продукції	Виробнича собівартість одиниці продукції	грн/т	зниження	Фінансовий облік
Продуктивність праці	Обсяг продукції на одного працівника	т/особу; грн/особу	зростання	Виробничий облік
Вартість енергії	Витрати на енергію на 1 т; частка в собівартості	грн/т; %	зниження	Фінансовий облік
Загальна ефективність обладнання	ОЕЕ	%	зростання	Виробничий облік

Джерело: складено автором.

Базові формули економічного блоку:

Рентабельність діяльності (рентабельність витрат) обчислюється за формулою (А.1):

$$R = (P / C) \times 100 \quad (\text{А.1})$$

де R - рентабельність діяльності, %; P - прибуток за період, грн; C - сукупні витрати за період, грн.

Частка енерговитрат у собівартості визначається за формулою (А.2):

$$d_E = (C_E / \text{COGS}) \times 100 \quad (\text{A.2})$$

де d_E - частка енерговитрат у собівартості, %; C_E - витрати на енергію за період, грн;
COGS - виробнича собівартість реалізованої продукції, грн.

Продуктивність праці визначається за формулою (A.3):

$$PR = Q / L \quad (\text{A.3})$$

де PR - продуктивність праці, т/особу (грн/особу); Q - обсяг продукції за період; L - середньооблікова чисельність працівників.

Загальна ефективність обладнання обчислюється за формулою (A.4):

$$\text{OEE} = A \times P \times Q \quad (\text{A.4})$$

де A - коефіцієнт готовності (доступності); P - коефіцієнт продуктивності; Q - коефіцієнт якості (усі - у частках одиниці).

Екологічні критерії (Е)

Критерій	КРІ	Одиниця	Орієнтир	Джерело/стандарт
Енергоємність плавлення	Споживання е/е на 1 т розплаву	кВт·год/т	зниження ≥ 3 %/рік	ISO 50001
Парникові гази (S1+S2)	Питомі викиди продукції	тCO ₂ е/т	$\leq 2,0$ тCO ₂ е/т, щорічне зниження	GHG Protocol, ISO 14064
Частка ВДЕ	Частка ВДЕ у споживанні е/е	%	понад 0; поетапно до ≥ 40 % до 2030 р.	GOO/PPA
Частка вторинного металу	Частка вторсировини у структурі шихти	%	≥ 30 %, зростання	Виробничий облік
Рівень циркулярності та утилізації	Рівень технологічних втрат; частка переробки шлаків	%	утилізація відходів ≥ 50 %; циркулярність ≥ 20 %	Журнал відходів

Джерело: складено автором на основі ISO 50001, GHG Protocol, ISO 14064.

Базові формули екологічного блоку:

Енергоємність продукції за електроенергією визначається за формулою (А.5):

$$EI_{\text{ел}} = E_{\text{ел}} / m \quad (\text{А.5})$$

де $E_{\text{ел}}$ - споживання електроенергії за період, кВт·год; m - маса придатної продукції, т. Одиниця виміру - кВт·год/т.

Питома вуглецева інтенсивність продукції визначається за формулою (А.6):

$$GI = (E_{S1} + E_{S2}) / m \quad (\text{А.6})$$

де E_{S1} , E_{S2} - викиди Score 1 та Score 2 за період, тCO₂е; m - маса придатної продукції, т. Одиниця виміру - тCO₂е/т.

Вуглецева інтенсивність матеріалу за структурою шихти визначається за формулою (А.7):

$$I_{\text{mix}} = x_P \cdot EF_P + x_S \cdot EF_S \quad (\text{А.7})$$

де x_P , x_S - частки первинного (P) та вторинного (S) металу в шихті ($x_P + x_S = 1$); EF_P , EF_S - питомі емісійні фактори первинного та вторинного металу, тCO₂е/т.

Викиди Score 1 та Score 2 розраховуються відповідно до GHG Protocol та ISO 14064 як добуток обсягу активності на емісійний фактор; для Score 2 застосовуються location-based та market-based підходи.

Сукупний ефект циркулярних практик узагальнюється інтегральним індексом утилізаційної ефективності (IUUE), розроблення якого передбачено в розділі 3 дисертації.

Соціальні критерії (S)

Критерій	KPI	Одиниця	Орієнтир	Джерело/стандарт
Охорона праці	LTIFR / TRIR	випадків/млн год	< 8 (зниження)	ISO 45001
Навчання персоналу	Години навчання на працівника	год/рік	≥ 24	HR-облік
Плинність кадрів	Рівень плинності	%	$\leq 5-8 \%$	HR-облік
Взаємодія з громадою	Обґрунтовані скарги	шт./рік	0	Служба КСВ
Етика різноманіття	Жінки в керівництві; рау gar	%	$\geq 30 \%; \leq 5 \%$	Кодекс етики

Джерело: складено автором на основі ISO 45001 та практик HR-менеджменту.

Базові формули соціального блоку:

Частота нещасних випадків із втратою працездатності обчислюється за формулою (А.8):

$$LTIFR = (N_{LT} \times 10^6) / H \quad (A.8)$$

де N_{LT} - кількість нещасних випадків із втратою працездатності за період; H - загальний відпрацьований час, год.

Загальна частота реєстрованих інцидентів обчислюється за формулою (А.9):

$$TRIR = (N_{TR} \times 10^6) / H \quad (A.9)$$

де N_{TR} - загальна кількість реєстрованих інцидентів за період; H - загальний відпрацьований час, год.

Плинність кадрів визначається за формулою (А.10):

$$T = (N_{зв} / L_{сер}) \times 100 \quad (A.10)$$

де T - плинність кадрів, %; $N_{зв}$ - кількість звільнених за період; $L_{сер}$ - середньооблікова чисельність працівників.

Композитний індекс блоку формується нормуванням окремих KPI до діапазону 0...1 (окремо для показників-стимуляторів і дестимуляторів) з подальшим зваженим агрегуванням за формулою (А.11):

$$Index = \sum w_i \cdot x'_i, \quad \sum w_i = 1 \quad (A.11)$$

де x'_i - нормоване значення i -го показника ($0 \dots 1$); w_i - ваговий коефіцієнт i -го показника; n - кількість показників блоку.

Управлінські критерії (G)

Критерій	KPI	Одиниця	Орієнтир	Джерело/стандарт
Зрілість енергоменеджменту	Статус ISO 50001 (0-3)	рівень	3 (сертифіковано)	ISO 50001
Дорожня карта декарбонізації	Наявність, покриття CAPEX	так/ні; %	≥20 % «зеленого» CAPEX	Стратегія, бюджет
Портфель ЕЕ-проектів	Виконання річного портфеля	%	≥80-90 %	Програма ЕЕ
Дані і прозорість	Звітність GRI/ESRS, верифікація	так/ні	Щорічно, зовнішня	Звіт сталості

Примітка. Показники частки ВДЕ та частки вторинної сировини (циркулярності) віднесено до екологічного блоку (табл. А.2) і в управлінському блоці не дублюються; порогові орієнтири узгоджено з розділом 3 (табл. 3.6, 3.16).

Джерело: складено автором на основі ISO 50001, GRI, ESRS.

Базові формули управлінського блоку:

Частка «зеленого» капіталу визначається за формулою (А.12):

$$d_3 = (\text{CAPEX}_3 / \text{CAPEX}_{\text{заг}}) \times 100 \quad (\text{А.12})$$

де d_3 - частка «зеленого» капіталу, %; CAPEX_3 - інвестиції у декарбонізацію, енергоефективність, ВДЕ та циркулярні рішення за період, грн; $\text{CAPEX}_{\text{заг}}$ - сукупні капітальні інвестиції за період, грн.

Індекс зрілості системи енергоменеджменту обчислюється за формулою (А.13):

$$\text{EnMS} = (w_1P + w_2D + w_3C + w_4A) / (w_1 + w_2 + w_3 + w_4) \quad (\text{А.13})$$

де P, D, C, A - рівні виконання (0-3) фаз циклу Plan-Do-Check-Act; $w_1 \dots w_4$ - вагові коефіцієнти фаз.

Б.1. АНКЕТА ЕКСПЕРТНОГО ОПИТУВАННЯ

щодо визначення вагомості блоків критеріїв оцінювання економічної ефективності малих і середніх промислових підприємств (МСПП) алюмінієвої галузі на засадах сталого розвитку

Шановний експерте! Просимо Вас оцінити відносну важливість чотирьох блоків критеріїв, що використовуються для інтегрального оцінювання та вибору альтернатив розвитку МСПП на засадах ESG-Е-підходу. Опитування є анонімним, його результати використовуються виключно в узагальненому вигляді для наукового дослідження.

Зміст блоків критеріїв:

- економічний блок (Econ) - рентабельність, продуктивність, енергоємність собівартості, ефективність використання обладнання;
- екологічний блок (Env) - вуглецева інтенсивність продукції, викиди Score 1/2, циркулярність матеріального потоку, енергоємність;
- соціальний блок (Soc) - безпека праці, навчання персоналу, кадрова стабільність;
- управлінський блок (Gov) - зрілість систем енергоменеджменту, частка «зеленого» капіталу, прозорість нефінансової звітності.

Інструкція. Оцініть важливість кожного блоку за шкалою від 0 до 10 балів (0 - неважливо, 10 - надзвичайно важливо). Оцінки блоків можуть збігатися. На основі усереднених і нормованих оцінок усіх експертів обчислюються вагові коефіцієнти блоків (сума ваг = 1).

Розділ А. Відомості про експерта (заповнюється анонімно):

Посада / функція: _____

Підгалузь (екструзія / лиття / прокат / вторинний алюміній): _____

Стаж роботи в галузі, років: _____

Розділ Б. Оцінювання важливості блоків критеріїв (0-10 балів):

Блок критеріїв	Оцінка (0-10)
Економічний (Econ)	
Екологічний (Env)	
Соціальний (Soc)	
Управлінський (Gov)	

Дякуємо за участь у дослідженні!

Б.2. ХАРАКТЕРИСТИКА ЕКСПЕРТНОЇ ГРУПИ

До експертної групи увійшли 7 фахівців підприємств алюмінієвої галузі (керівники, головні інженери та енергоменеджери) зі стажем роботи в галузі не менше п'яти років (табл. Б.1).

Таблиця Б.1

Характеристика експертів

Експерт	Посада / функція	Підгалузь	Стаж, років
E1	Головний інженер	Екструзія	12
E2	Директор підприємства	Лиття / вторинний алюміній	9
E3	Енергоменеджер	Прокат	7
E4	Головний технолог	Екструзія	15
E5	Заступник директора з розвитку	Вторинний алюміній	8
E6	Керівник із якості та ESG	Лиття	6
E7	Головний енергетик	Ливарне виробництво	11

Б.3. ЗВЕДЕНІ ВІДПОВІДІ ЕКСПЕРТІВ

Таблиця Б.2

Експертні оцінки важливості блоків критеріїв, балів (0-10)

Експерт	Econ	Env	Soc	Gov	Сума
E1	10	4	2	5	21
E2	9	7	5	4	25
E3	7	8	3	5	23
E4	7	6	5	4	22
E5	8	6	3	1	18
E6	9	7	2	1	19
E7	10	6	3	3	22
Середнє	8.57	6.29	3.29	3.29	21.43

Б.4. РОЗРАХУНОК ВАГОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ

Ваговий коефіцієнт кожного блоку визначено як середнє значення нормованих (за сумою балів кожного експерта) оцінок усіх експертів за формулою:

$$w_j = (1/m) \cdot \sum_i (x_{ij} / \sum_j x_{ij}), \quad \sum w_j = 1 \text{ (Б.1)}$$

де x_{ij} - оцінка j -го блоку i -м експертом;

$m = 7$ - кількість експертів.

Таблиця Б.3

Нормовані оцінки та підсумкові вагові коефіцієнти

Експерт	Econ	Env	Soc	Gov
E1	0.476	0.190	0.095	0.238
E2	0.360	0.280	0.200	0.160
E3	0.304	0.348	0.130	0.217
E4	0.318	0.273	0.227	0.182
E5	0.444	0.333	0.167	0.056
E6	0.474	0.368	0.105	0.053
E7	0.455	0.273	0.136	0.136
Вага w_j	0.40	0.30	0.15	0.15

Отримані вагові коефіцієнти: економічний блок - 0,40; екологічний - 0,30; соціальний - 0,15; управлінський - 0,15. Саме ці значення використано у формулі інтегрального індексу IESG-E.

Б.5. ПЕРЕВІРКА УЗГОДЖЕНОСТІ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК

Для перевірки узгодженості думок експертів оцінки кожного експерта проранговано (ранг 1 - найважливіший блок) та обчислено коефіцієнт конкордації Кендалла W.

Таблиця Б.4

Ранги блоків критеріїв за оцінками експертів

Експерт	Econ	Env	Soc	Gov
E1	1	3	4	2
E2	1	2	3	4
E3	2	1	4	3
E4	1	2	3	4
E5	1	2	3	4
E6	1	2	3	4
E7	1	2	3.5	3.5
Сума рангів	8	14	23.5	24.5

Коефіцієнт конкордації Кендалла обчислено за формулою:

$$W = 12 \cdot S / [m^2 \cdot (n^3 - n) - m \cdot \Sigma T], \quad (Б.2)$$

де S - сума квадратів відхилень сум рангів від їх середнього;

m = 7 - число експертів;

n = 4 - число блоків;

ΣT - поправка на зв'язані ранги.

Розрахункове значення $W=0,776$, що свідчить про високий ступінь узгодженості думок експертів. Статистичну значущість перевірено за критерієм χ^2 : $\chi^2 = m \cdot (n - 1) \cdot W = 7 \cdot 3 \cdot 0.776 = 16.30$.

Оскільки $\chi^2_{\text{розн}} = 16,30$ перевищує критичне значення $\chi^2_{\text{крит}} = 7,815$ (для рівня значущості 0,05 та числа ступенів свободи $df=3$), узгодженість експертних оцінок є статистично значущою ($p = 0.0010$). Отже, отримані вагові коефіцієнти є надійними.



CENTRE OF SOCIOLOGICAL RESEARCH (CSR)

Fundacja Centrum Badań Socjologicznych

ul. Bolesława Śmiałego 22 lok. 27

70-347, Szczecin, Poland

e-mail: office@csr-pub.eu

<https://www.csr-pub.eu/>

Ref. No. 2-03 Date: 25.03.2026

CERTIFICATE

on implementation of the research results presented by Viktor Tryhuba

This is to certify that the scientific findings and practical recommendations developed by Viktor Tryhuba have been accepted for implementation and are being utilized in the research and analytical activities of the Centre of Sociological Research (CSR, Szczecin, Poland).

Particularly, the Centre uses conceptual framework and set of ESG indicators for sociological monitoring and expert assessment of SMEs' readiness for decarbonization and ESG reporting integration under the transition to a circular economy and tightening European environmental standards (including EU Green Deal and carbon adjustment mechanisms).

The use of this analytical framework enables the Centre to conduct comparative monitoring in the following areas: analysis of the dynamics of ESG implementation by SMEs and its impact on the economic effectiveness of enterprises; comparative analysis of the state of ESG-based economic activity of industrial enterprises in the EU and Eastern Partnership countries.

Prof. dr hab. Yuriy Bilan
Head of the Research Unit
Centre of Sociological Research

A handwritten signature in blue ink, reading "Yuriy Bilan".



**ВСЕУКРАЇНСЬКА ГРОМАДСЬКА ОРГАНІЗАЦІЯ
«АСОЦІАЦІЯ ПЛАТНИКІВ ПОДАТКІВ УКРАЇНИ»**

Територіальне відділення в Рівненській області

Юридична і поштова адреса: 33023, Україна, м. Рівне, вул. Відінська, 8, офіс 212
тел./факс 0362-46-01-54, моб. 067-240-75-49; rivneappu@ukr.net

№ 07-049 від 8 квітня 2026 року

ДОВІДКА

**про впровадження результатів дисертаційного дослідження
Тригуби Віктора Юрійовича**

Запропоновані Тригубою Віктором Юрійовичем науково-методичні підходи до забезпечення економічної ефективності малих і середніх промислових підприємств на засадах сталого розвитку, використано у діяльності територіального відділення Всеукраїнської громадської організації «Асоціація платників податків України» в Рівненській області.

Обґрунтовані Тригубою В. Ю. науково-методичні рекомендації щодо удосконалення нефінансової звітності та моніторингу результатів діяльності підприємств на засадах ESG-критеріїв (екологічна, соціальна та управлінська відповідальність) із врахуванням посилення вимог до звітності зі сталого розвитку та нестабільності міжнародних ринків капіталу, використовуються в аналітичній діяльності, наданні консультаційно-методичної допомоги підприємствам-членам Асоціації та підготовці пропозицій щодо покращення умов ведення бізнесу в регіоні.

**Директор Територіального відділення
ВГО «АППУ» в Рівненській області**



Лариса САДОВА



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
(НУВГП)

вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, тел. (0362) 63 30 98, факс (0362) 63 32 09,

e-mail: mail@nuwm.edu.ua, web: https://nuwm.edu.ua

код ЄДРПОУ 02071116

Від 10.04.2026 № ОН-13

На № _____ від _____

ДОВІДКА

про використання у навчальному процесі
Національного університету водного господарства та природокористування
досліджень і розробок, одержаних при виконанні дисертаційної роботи
ТРИГУБИ Віктора Юрійовича
на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
051 – Економіка

Результати наукових досліджень, викладені у дисертації здобувача ступеня доктора філософії Тригуби Віктора Юрійовича щодо забезпечення економічної ефективності діяльності малих і середніх промислових підприємств на засадах сталого розвитку, використовуються у навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за спеціальністю С1 «Економіка та міжнародні економічні відносини» та здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 051 «Економіка».

Отримані наукові результати використовуються при викладанні навчальних дисциплін:

- «Управління ризиками та конкурентоспроможністю»: *Тема 4. Регулювання ризиків;*
- «Аналіз економічної діяльності»: *Тема 1. Методика факторного аналізу економічної діяльності.*

Застосування результатів дослідження сприяє підвищенню якості підготовки здобувачів вищої освіти, поглибленню їхніх знань щодо методології економічного аналізу, оцінювання ефективності діяльності суб'єктів господарювання та формуванню сучасних аналітичних компетентностей у сфері прийняття управлінських рішень.

Проректор з наукової роботи,
та міжнародних зв'язків НУВГП,
доктор економічних наук, професор



Наталія САВІНА

Список опублікованих праць за темою дисертації

Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав:

1. Halyna Mishchuk, Viktor Tryhuba. From Energy Intensity to Sustainability: An Analysis of Trends in the Aluminium Industry. *Vadyba Journal of Management*. 2024. Vol. 40, No. 2. P. 51 - 56. URL: <https://ltvk.lt/wp-content/vadyba/40-2/vadyba.2024.2.05.pdf> DOI:<https://doi.org/10.38104/vadyba.2024.2.05>. (особистий внесок - 0,5 д.а.).

Публікації у наукових фахових виданнях України:

2. Тригуба В. Ю. Можливості застосування методів операційного менеджменту у забезпеченні стійкого економічного розвитку ливарних підприємств. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Економічні науки. 2023. Вип. 3 (103). С. 287 - 300. URL:<https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/econ/article/view/1336> DOI:<https://doi.org/10.31713/ve3202327>. (0,75 д.а.).

3. Тригуба В. Ю. Концептуальні засади сталого розвитку: історичні витоки, сучасні виклики та перспективи впровадження. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Економічні науки. 2024. Вип. 4 (108). С. 322 - 331. URL: <https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/econ/article/view/1677> DOI: <https://doi.org/10.31713/ve4202429>. (0,6 д.а.).

4. Тригуба В. Ю. Прогнозування викидів CO₂ у алюмінієвому секторі за допомогою моделі ARIMA: аналіз ефективності та перспективи декарбонізації. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Економічні науки. 2025. Вип. 1 (109). С. 175 - 185. URL: <https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/econ/article/view/1629> DOI: <https://doi.org/10.31713/ve1202516>. (0,65 д.а.).

5. Тригуба В. Ю. Економіко-аналітична оптимізація процесу екструзії алюмінію на основі моделювання браку та енергоефективності. Вісник Львівського університету. Економічні науки. 2025. Вип. 69. С. 106 - 117. URL:

<https://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/economics/article/view/14093> DOI: <http://dx.doi.org/10.30970/ves.2025.69.0.6922>. (0,77 д.а.).

6. Міщук Г. Ю., Тригуба В. Ю. Інтегральне оцінювання та вибір альтернатив розвитку малих і середніх промислових підприємств на основі ESG-підходу. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2026. № 2. С. 371 - 376. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2026-352-49> . (особистий внесок - 0,5 д.а.).

Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Тригуба В. Ю. Стійкий розвиток підприємств з виробництва литих деталей: особливості та зв'язок з цілями сталого розвитку. Стратегії глобальної конкурентоспроможності: соціально-економічні виміри: збірник тез X Міжнародної науково-практичної конференції (м. Черкаси, 23.03.2023 р.). Черкаси, 2023. С. 83 - 85. URL: <http://surl.li/lluqq>. (0,1 д.а.).

8. Тригуба В. Ю. Концептуальні засади оцінки ефективності управління сталим розвитком. Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки: збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти (м. Рівне, 11 - 12.05.2023 р.). Рівне: НУВГП, 2023. С. 426 - 428. (0,1 д.а.).

9. Тригуба В. Ю. Управління стійким розвитком підприємств з виробництва литих деталей складної форми в Україні. Підприємництво та торгівля: сучасний стан та перспективи розвитку: збірник тез III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Луцьк, 18.05.2023 р.). Луцьк, 2023. С. 70. URL: <https://konfkafptl.lntu.edu.ua/index.php/KKPTLLNTU/issue/view/2/2>. (0,1 д.а.).

10. Тригуба В. Ю. Вплив декарбонізації алюмінієвої промисловості на розвиток туризму. Перспективи розвитку індустрії туризму і гостинності в Україні та світі: збірник тез I Міжнародної науково-практичної конференції (м. Луцьк, 2024 р.). Луцьк, 2024. С. 83 - 86. (0,1 д.а.).

Тригуба В. Ю. Використання технологій Індустрії 4.0 та 5.0 для зменшення вуглецевого сліду в сучасних бізнес-моделях алюмінієвого виробництва. Матеріали IX Міжнародної конференції УРСЕС (м. Харків, ДБТУ, 2025 р.). Харків,

2025. URL: <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2025/03/conf-06-07-03-25-progrv.pdf>. (0,1 д.а.).