

*Університети для сталого розвитку*

# СТАЛЕ СПОЖИВАННЯ ТА ВИРОБНИЦТВО У ГЛОБАЛЬНИХ ЛАНЦЮГАХ СТВОРЕННЯ ВАРТОСТІ



**Національний технічний університет  
“Дніпровська політехніка”**

**СТАЛЕ СПОЖИВАННЯ  
ТА ВИРОБНИЦТВО  
У ГЛОБАЛЬНИХ ЛАНЦЮГАХ  
СТВОРЕННЯ ВАРТОСТІ**

---

---

**Монографія**

**Дніпро – Дрезден – 2024**

УДК 338.242.2 (477)

*Затверджено до друку Вченою радою НТУ «Дніпровська політехніка»  
(Протокол № 13 від 26 грудня 2023).*

**Рецензенти:**

Амоша О. І. – проф., д.е.н., Академік НАН України, директор інституту економіки промисловості НАН України; Федоряк М. М. – проф., д.біол.н., завідувач кафедри екології та біомоніторингу, Чернівецький державний університет імені Юрія Федьковича; Вагонова О. Г. проф., д.е.н., завідувач кафедри прикладної економіки, підприємництва та публічного управління, НТУ «Дніпровська політехніка».

**С 76** Стале споживання та виробництво у глобальних ланцюгах створення вартості : монографія. За заг. ред. А. В. Павличенка та Л. Л. Палєхової. Дніпро-Дрезден, 2024. 245 с.

У цій монографії досліджуються сучасні виклики управління сталим розвитком у глобальних ланцюгах створення вартості з урахуванням завдань євроінтеграції, що постають перед українською промисловістю. Автори висвітлюють тенденції циркулярної економіки як способу управління сталим розвитком металургійної промисловості та обговорюють перспективи сталої трансформації енергетичного сектору як невід’ємної складової повоєнної відбудови України. Представлені результати дослідження можуть бути цікаві науковцям, викладачам, державним службовцям, а також керівникам підприємств.

*Публікація підготовлена Національним технічним університетом «Дніпровська політехніка» в рамках міжнародного спільного проєкту «Створення німецько-української університетської мережі для забезпечення успішної освіти в українських університетах під час війни та кризи» за підтримки програми DAAD «Україна цифрова: Забезпечення академічної успішності в умовах кризи, 2023».*



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Deutscher Akademischer Austauschdienst  
German Academic Exchange Service

ISBN: 978-3-00-080706

Надруковано в Дрездені, Німеччина: Видавництво - fontanum

©Колектив авторів, 2024

**Dnipro University of Technology**

**SUSTAINABLE CONSUMPTION  
AND PRODUCTION  
IN GLOBAL VALUE CHAINS**

---

---

**Monograph**

**Dnipro – Dresden – 2024**



УДК 338.242.2 (477)

*Approved for publication by the Academic Council of the Dnipro University of Technology (Protocol № 13, December 26, 2023).*

**Reviewers:**

Amosha O. – Prof. Dr.-Econ., Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Director of the Institute of Industrial Economics of the National Academy of Sciences of Ukraine; Fedoriak M. – Prof. Dr.-Biol., Head of the Department of Ecology and Biomonitoring, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University; Vagonova O. – Prof., Dr.-Econ., Head of the Department of Applied Economics, Entrepreneurship and Public Administration, Dnipro University of Technology.

**C 76** Sustainable consumption and production in global value chains: Ed.: A. Pavlychenko, L. Paliekhova. Dnipro – Dresden: 2024. 245 p.

This monograph explores the current challenges of sustainability governance in global value chains, taking into account the tasks of European integration facing Ukrainian industries. The authors highlight the trends in the circular economy as a way of managing the sustainable development of the metallurgical industry and discuss the prospects for sustainable transformation of the energy sector as an essential component of Ukraine’s post-war reconstruction. The presented research results may be of interest to scientists, lecturers, government officials as well as business managers.

*This publication was prepared by the Dnipro University of Technology within the International joint project “Establishment of German-Ukrainian University Network for Securing Successful Education in Ukrainian Universities in Time of War and Crisis”, under the financial support from the DAAD program “Ukraine digital: Ensuring academic success in times of crisis, 2023”.*



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Deutscher Akademischer Austauschdienst  
German Academic Exchange Service

**ISBN: 978-3-00-080706**

Printed in Dresden, Germany: fontanum

©Copyright by authors, 2024

## З М І С Т

<b>Вступне слово наукових редакторів</b>	<b>7</b>
--	----------

<b>РОЗДІЛ I</b>	
<b>ПРОБЛЕМИ ІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНСЬКОЇ</b>	
<b>ПРОМИСЛОВОСТІ В ГЛОБАЛЬНІ ЛАНЦЮГИ</b>	
<b>СТВОРЕННЯ ВАРСТОСТІ</b>	<b>8</b>

1 Синергетичні ефекти екологічної сталості в глобальних ланцюгах створення вартості	9
---	---

*Артем Павличенко, Людмила Палехова*

2 Відповідальне споживання і виробництво в промисловості: проблеми вимірювання прогресу в досягненні Цілі сталого розвитку 12	30
---	----

*Людмила Палехова*

3 Дослідження факторів, що впливають на сталий розвиток у промислових ланцюгах створення вартості	54
---	----

*Тетяна Куваєва*

4 Моделювання сталого розвитку еколого-економічної системи	83
--	----

*Світлана Ус, Любов Тимошенко*

<b>РОЗДІЛ II</b>	
<b>ЕКОЛОГІЧНІ ТА КЛІМАТИЧНІ ВИКЛИКИ ДЛЯ</b>	
<b>МЕТАЛУРГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ</b>	<b>104</b>

5 Драйвери та бар'єри переходу металургії України до циркулярної економіки	105
--	-----

*Артем Павличенко, Людмила Палехова*

6 Ретроспективне дослідження змін основних екологічних показників металургійного комплексу України	121
--	-----

*Олена Матухно, Карина Белоконь, Олена Борисовська*

7 Шляхи низьковуглецевої трансформації чорної металургії	139
--	-----

*Володимир Шатоха*

<b>РОЗДІЛ III</b>	
<b>ЕНЕРГЕТИЧНА СТАЛІСТЬ ЯК СКЛАДОВА</b>	
<b>ВІДПОВІДАЛЬНОГО СПОЖИВАННЯ І ВИРОБНИЦТВА</b>	150
8 Проблеми сталого розвитку електроенергетичної системи України <i>Дмитро Ципленков, Бобров Олексій</i>	151
9 Управління енергоефективністю в промисловому секторі: досвід Європейського Союзу та України <i>Людмила Палехова</i>	185
10 Синтез математичної моделі зарядної станції для електромобілів <i>Руслан Багач</i>	205
<b>Відомості про авторів</b>	239

# ВСТУПНЕ СЛОВО НАУКОВИХ РЕДАКТОРІВ

## Шановні колеги і читачі!

Вашій увазі пропонується монографічне дослідження, що виконано у рамках Міжнародного українсько-німецького проєкту «Цифрова Україна: Забезпечення академічної успішності в умовах кризи під час війни» за підтримки Німецької служби академічних обмінів (DAAD) протягом 2023-2024 років.

Слід також зазначити, що дослідження виконувалося відповідно до завдань Меморандуму між Бранденбурзьким технічним університетом Коттбус-Зенфтенберг (BTU), Німеччина та НТУ «Дніпровська політехніка», Україна – «Про взаєморозуміння щодо реалізації спільного науково-дослідницького проєкту з питань сталого розвитку та електронного навчання у вищій освіті».

Цілі дослідження були розроблені, спираючись на пріоритети Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, Стратегії сталого розвитку ЄС до 2030 року та Європейської зеленої угоди, враховуючі завдання реконструкції української промисловості та здійснення зеленого переходу, що зафіксовані в Плані повоєнного відновлення Україні, прийнятого українським урядом 21 квітня 2022, та цілісного бачення євроінтеграційних реформ, що викладається в комюніке Європейської Комісії «Ukraine Relief and Reconstruction» від 18 травня 2022 року.

Три взаємопов'язані розділи монографії, які мають безумовну теоретичну значущість та практичну актуальність, об'єднані єдиним завданням – комплексно вивчити проблему повоєнного відновлення та поширення інтеграції української промисловості, зокрема гірничо-металургійного сектора, в європейську систему справедливого виробництва. Автори виходять з того, що перехід українських промислових підприємств на моделі відповідального споживання і виробництва є цілком раціональною метою, щоб закласти основи зеленого зростання та енергетично незалежного майбутнього країни.

Представлені дослідження розкривають окремі ракурси нових викликів для українських промисловців, враховуючи посилення екологічних і кліматичних вимог відповідно до Європейського зеленого курсу, аналізують шляхи та методи трансформації гірничо-металургійного комплексу на принципах відповідального розвитку, а також з'ясовують проблеми та перспективи формування сталої енергетики як безумовної складової повоєнного відновлення України.

*З повагою*

*Артем Павличенко, Людмила Палєхова*

Дніпро – Дрезден, 2024

# РОЗДІЛ І

## ПРОБЛЕМИ ІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНСЬКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ В ГЛОБАЛЬНІ ЛАНЦЮГИ СТВОРЕННЯ ВАРСТОСТІ

Формування екологічного потенціалу сталого розвитку відноситься до однієї з найактуальніших проблем, що стоять перед усіма країнами світу, особливо для перехідних економік. Порядок денний сталого розвитку до 2030 року визначає одночасно декілька важливих аспектів сталого переходу. Ціль 12 «Відповідальне споживання та виробництво» покликана створити новий тип матеріальної основи для реалізації економічного зростання в гармонії з природним середовищем. Відповідно кожна держава повинна розробити власну національну політику, яка сприятиме прискоренню переходу на принципи «зеленої» економіки, враховуючи національну специфіку, галузеву структуру та місцеві проблеми організації бізнесу.

Як відомо, українська економіка тісно пов'язана з європейськими промисловими ланцюгами створення вартості – зокрема, українська металургійна продукція майже повністю експортується до Європи, тому має значний вплив цієї галузі на сталість європейської економіки. Враховуючи євроінтеграційну мету України, проблема впровадження стандартів екологічної сталості у провідних галузях промисловості є не лише одним із головних політичних викликів для внутрішніх перетворень, а й потужною можливістю вийти на новий рівень «конструктивної інтеграції» – міждержавної кооперації і спільних ініціатив у ключових секторах економіки країни.

Мета цього розділу полягає в тому, щоб розширити розуміння проблем та завдань інтеграції української промисловості в глобальні і європейські ланцюги створення вартості, що прагнуть до кліматичної нейтральності та посилення принципів відповідального виробництва і споживання.

*Глава перша* відкриває дискусію про особливості глобальних ланцюгів створення вартості, демонструє синергетичні впливи участі українських експортерів на сталість європейських виробничих ланцюгів, а також розкриває проблеми зеленого розвитку української промисловості у післявоєнному відновленні. *Глава друга* аналізує зміст еволюції розуміння екологічної сталості у розвитку промислової сфери та проблеми її практичного вимірювання в рамках ЦСР 12. За висновками з'ясовуються «критичні точки» у повоєнному відновленні промисловості. *Глава третя* концентрує увагу на вивченні методів дослідження стану сталого розвитку та особливостей його складових в промислових ланцюгах створення вартості, зроблена систематизація факторів посилення сталості промисловості на прикладі українських підприємств важкого машинобудування. *Глава четверта* викладає методичний підхід до обґрунтування прийняття управлінських рішень для сталого розвитку промислових підприємств, розглядаючи його як складну еколого-економічну систему, пропонуючи методи оптимізації управлінських рішень за допомогою когнітивного моделювання.

# ГЛАВА 1

## СИНЕРГЕТИЧНІ ЕФЕКТИ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТАЛОСТІ В ГЛОБАЛЬНИХ ЛАНЦЮГАХ СТВОРЕННЯ ВАРТОСТІ

**Артем Павличенко, Людмила Палєхова\***

**Анотація.** Глава має розширити розуміння синергетичної природи екологічної сталості в промислових ланцюгах створення вартості. Дослідження охоплює три блока питань: уточнює сучасні зміни у глобальних ланцюгах створення вартості та з'ясовує синергію впровадження в них аспектів екологічно сталого розвитку; підтверджує взаємні впливи екологізації розвитку українських підприємств-експортерів та впровадження Європейського зеленого курсу в глобальних промислових ланцюгах; пояснює спільну екологічну вразливість українських промислових підприємств та європейської промисловості через війну росії проти України. Автори аргументують необхідність повного впровадження норм європейського екологічного і кліматичного права в українське законодавство.

**Ключові слова:** глобальні ланцюги створення вартості, європейські ланцюги створення вартості, екологічна сталість, промислова сфера, Україна.

### 1.1 Вступ

У Порядку денному у сфері сталого розвитку до 2030 року визначено, що розвиток ефективної і екологічно безпечної промисловості формує матеріальну основу для вирішення комплексу проблем сталого розвитку в усіх інших секторах і підсекторах економіки. Зокрема ЦСР 12 «Відповідальне споживання та виробництво» вимагає знизити ресурсоемність економіки та зменшити обсяг утворення та переробки відходів на основі інноваційних технологій і виробництв; відповідно ЦСР 13 «Пом'якшення наслідків зміни клімату» очікує від підприємств стійкого скорочення викидів парникових газів. Схвалена у 2015 році Аддис-Абебська програма дій (п.11) чітко визначає наскрізну роль політики екологізації промислового сектору як «зادіяння істотних синергетичних взаємозв'язків» для того, щоб інклюзивна та стала індустріалізація сприяла прогресу сталості в усіх процесах економічної діяльності.

---

\***Артем Володимирович Павличенко** – док. техн. наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Перший проректор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна. E-mail: [pavlichenko.a.v@ntu.one](mailto:pavlichenko.a.v@ntu.one); <https://orcid.org/0000-0003-4652-9180>. **Палєхова Людмила Львівна** – канд. екон. наук, доцент, професор кафедри маркетингу, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна. E-mail: [Paliekhova.L.L@ntu.one](mailto:Paliekhova.L.L@ntu.one); <https://orcid.org/0000-0003-0217-5755>.



На зустрічі у 2017 році лідери G20 прийняли декларацію «Про формування взаємопов'язаного світу», яка підтвердила, що глобальні ланцюги створення вартості (англ. Global Value Chains, GVCs) стали домінуючим механізмом у сталому розвитку підприємництва. Внаслідок цього загострюється проблема екологічної відповідальності економічної активності уздовж глобальних виробничих зв'язків<sup>1</sup>. Усвідомлюючи нову реальність, Єврокомісія приймає Європейський зелений курс<sup>2</sup>, а пізніше – Оновлену промислову стратегію 2020: Зміцнення єдиного ринку для відновлення Європи<sup>3</sup>, що включає низку організаційних, економічних та техніко-технологічних заходів з метою прискорення «зеленого переходу» промислової сфери в пов'язаних економіках Європи.

Восени 2023 року, виконуючи Промисловий план Зеленої угоди (англ. Green Deal Industrial Plan), ЄС починає впровадження механізму транскордонної вуглеводної корекції (англ. Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)<sup>4</sup>, метою якого є встановлення справедливої ціни на вуглецеві товари, що надходять до ЄС. Через це Україна, яка завжди мала сильну експортну орієнтацію на європейський ринок, зіткнулася з проблемою – вимоги декарбонізації можуть стати болісними для значної частини українських промислових компаній, зокрема металургійної галузі [2].

Незважаючи на стан продовження військової агресії РФ проти України, 18 березня 2024 року уряд України затвердив Ukraine Facility Plan повоєнного відновлення, що буде виконуватися за фінансової підтримки з боку ЄС<sup>5</sup>. Окрему увагу документ приділяє завданням екологізації промислових галузей в рамках комплексу реформ для набуття Україною повноправного членства в Європейському Союзі.

---

<sup>1</sup>Див.: G20 Leaders' Declaration (2017): Shaping an interconnected world, Hamburg, 8 July 2017. European Commission – [http://europa.eu/rapid/press-release\\_STATEMENT-17-1960\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_STATEMENT-17-1960_en.htm).

<sup>2</sup>Європейський зелений курс (англ. European Green Deal) – це набір політичних ініціатив, висунутих Європейською Комісією, загальною метою яких є зробити Європейський континент кліматично нейтральним до 2050 року. Для цього був розроблений План дій до 2030 року, що охоплює всі сектори економіки, зокрема, транспорт, енергетику, сільське господарство, будівництво та промисловість. У червні 2020 року на саміті Україна-ЄС було підписано угоду «Кліматичний пакет для стабільної економіки в Україні» (CASE), що мала сприяти фінансуванню українських проектів щодо переходу до чистої і кліматично нейтральної економіки (див.: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_017-20#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_017-20#Text)).

<sup>3</sup>Див.: Updating the 2020 Industrial Strategy: towards a stronger Single Market for Europe's recovery – [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_21\\_1884](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_1884).

<sup>4</sup>CBAM фактично створює новий вимір для промислової продукції – вуглецеємність. Відтепер, покупці, окрім фізичних властивостей та ціни на продукцію, будуть аналізувати ланцюги поставок для вибору постачальника за критерієм найнижчих викидів CO<sub>2</sub>, що пов'язані з технологіями виробництва продукції (див.: Carbon Border Adjustment Mechanism – [https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism\\_en](https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en)).

<sup>5</sup>Див.: EU Solidarity with Ukraine. The Ukraine Facility Supporting Ukraine's recovery, reconstruction, and path towards EU accession – [https://eu-solidarity-ukraine.ec.europa.eu/eu-assistance-ukraine/ukraine-facility\\_en](https://eu-solidarity-ukraine.ec.europa.eu/eu-assistance-ukraine/ukraine-facility_en).

Зокрема Ukraine Facility Plan передбачає прийняття Закону України «Про основні засади державної кліматичної політики», розробку законодавчих актів, що посилюють запобігання, зменшення та контроль промислового забруднення, а також про врегулювання питань незаконної вирубки лісу і створення прозорої системи обігу деревини. Планується відновити та посилити обов'язкову систему моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів для операторів установок<sup>6</sup>, а також розробити національну стратегію переходу до економіки замкнутого циклу і ухвалити план дій, що стосується зменшення відходів від ресурсної економіки до 2030 року.

Таким чином, проблема досягнення екологічної сталості української промисловості сьогодні розглядається одним із головних політичних завдань повоєнної відбудови в контексті європейської інтеграції України та нарощування можливостей експорту українських промислових товарів на європейський ринок.

*Аналіз останніх публікацій.* Насамперед дослідження підтверджують, що прискорення глобалізації докорінно змінило організацію економіки в напрямку значно більшої міжнародної інтеграції, посилення функціональної взаємозалежності промислових підприємств та отримання суттєвих вигід від «зеленого» переходу уздовж пов'язаних виробництв [1-5]. Так, Surbhi Uniyal та ін. [3] доводять, що спільне впровадження екологічних стандартів в GVCs допомагає партнерам підвищити свою операційну ефективність, спираючись на результати інших компаній, знизити ризики невизначеностей та розширити можливості стійкого ринкового розвитку.

Вчені, зокрема Stefano Ponte [4], розглядають екологізацію розвитку об'єднуючим джерелом для створення додаткової вартості, що сприяє процесу «накопичення зеленого капіталу» в GVCs. Стверджується, що екологічність взагалі перетворюється на товар – її можна розвивати, купувати, просувати, продавати та управляти, як і всіма іншими цінностями. Так, Alberto N. Conejo та ін. [5] на прикладі сталеливарної промисловості показують, що потенціал побічних продуктів може бути вигодою у забезпеченні ресурсами та зменшенні відходів в інших галузях виробничих ланцюгів.

Більш того, дослідження доводять [1-2; 7-8], що посилення вимог екологічної сталості запускає синергетичні ефекти в пов'язаних виробничих процесах, особливо в ресурсних галузях, посилюють зацікавленість підприємств у впровадженні добровільних галузевих та міжгалузевих стандартів екологічно сталого розвитку та співпраці у ланцюгах на основі використання циркулярних практик.

---

<sup>6</sup>Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів», що вступив в силу 1.01.2021 р., є зобов'язанням України за Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, впроваджує положення Директив № 2003/87/ЄС та № 2004/101/ЄС, а також виконує вимоги Рамкової конвенції ООН про зміну клімату та Паризької угоди. Очікувалось, що у 2022 році будуть отримані перші верифіковані дані стосовно вуглецевих викидів за 2021 рік. Але станом на зараз система МЗВ не працює у повному режимі і Україна не може прискорити реалізацію дорожньої карти з декарбонізації.

Разом з тим автори [8-11] свідчать, що незважаючи на ретельне обговорення на високих міжнародних форумах, перехід до моделей сталого споживання та виробництва ще не отримав широких тенденцій. В більшості країн ресурсна складова виробництва фундаментально не змінилася, промислові підприємства залишаються найбільшими споживачами природної сировини та енергії. Зокрема наші дослідження доводять, що в Україні бізнес-інтереси великих промислових компаній поки не мають чіткого зв'язку з наративами сумісної цінності зеленого виробництва [1-2; 17-18].

З цієї точки зору публікації підкреслюють необхідність критичного переосмислення теорії управління розвитком бізнесу в GVCs, щоб сприяти практикам збільшення спільного «зеленого капіталу». Зокрема Neil M. Coe [6], Tatiana Brates [7] та інші автори обговорюють місію ключових гравців міжнародних ринків щодо просування екологічної політики в пов'язаних з ними GVCs.

Водночас є дослідження, які попереджають, що сильні компанії можуть не тільки розвивати, але й нівелювати ідеї озеленення виробництва. Зокрема Peter Lund-Thomsen [9] наводить приклади, як багатосторонні ініціативи стають інструментами регулятивного захоплення виробничих ланцюгів, обслуговують потреби світових брендів для мінімізації цін на ресурси та швидкого масштабування продажів, тим самим підривають мету впровадження систем галузевих стандартів сталого розвитку.

Вчені впевнені [7-11], що успішність руху до відповідального виробництва значною мірою залежить від узгодженої політики на національному рівні, яка повинна сприяти інтенсивному нарощуванню екологічної сталості в ключових секторах своєї економіки та країнах-партнерів. Зокрема, Sachin Mangla та ін. [10] приходять до висновку, що саме «організаційні бар'єри» є ключовими перешкодами на шляху до масштабної екологізації виробництва; Ari Van Assche та ін. [11] обговорюють роль державного управління для просування екологічності в GVCs, наполягають на необхідності нової державної політики, яку уряди мають здійснювати, щоб допомогти провідним промисловим компаніям змінити свою бізнес-модель.

Загалом можна стверджувати, що за останні роки вчені накопичили вражаючу кількість публікацій, які безумовно просунули наше розуміння особливостей бізнесу та зміни конфігурації виробничих зв'язків в GVCs. В українській науковій літературі активно обговорюються окремі проблеми інтеграції українських підприємств в GVCs, зокрема з'ясовуються екологічні вимоги та ризики [12-13], екологічні, економічні та інші ефекти [14], вибір екологічно орієнтованої стратегії просування [15] тощо. Разом з тим спеціальні літературні огляди, зокрема Liena Kapo та ін. [16], показують наявність суттєвих прогалин у дослідженнях промислових GVCs. Підтверджується багато невизначеностей, що стосуються синергетичних впливів екологічної сталості уздовж GVCs, вимірювання матеріального сліду в управлінні сталістю, вразливості промислових GVCs в умовах кризи, зокрема через збройну агресію РФ проти України.

*Мета дослідження.* Глава має розширити розуміння синергетичної природи екологічної сталості в промислових ланцюгах створення вартості, зокрема підтвердити взаємні впливи екологізації розвитку окремих ланок у GVCs.

Дослідження включило три блока питань: (1) вивчення сутності GVCs та синергії впровадження в них екологічних аспектів сталого розвитку; (2) з'ясування взаємозв'язку екологічного розвитку українських підприємств-експортерів та успішності впровадження зеленого курсу в європейських промислових ланцюгах; (3) підтвердження спільної екологічної вразливості українських промислових підприємств та європейської промисловості через війну рф проти України.

*Методика дослідження.* Враховуючи зростання складності явищ, пов'язаних із GVCs, і відсутність консенсусу щодо розуміння відповідальності за характеристики екологічної сталості уздовж ланцюгів створення вартості, необхідна керівна концептуальна основа, яка допоможе системно обґрунтувати висновки дослідження. Методологічний підхід спирався на три основні аргументи: по-перше, на основі сучасних положень теорії глобальних ланцюгів створення вартості та існуючої сукупності глобальних екологічних показників сталого розвитку можна адекватно інтерпретувати сучасні виклики екологічно сталого розвитку для експортно-орієнтованих галузей промисловості; по-друге, екологізація розвитку промисловості України не є тільки внутрішньою проблемою, її слід розглядати у контексті спільного завдання Європейського зеленого курсу; по-третє, дослідження спирається на поняття і метрики вимірювання екологічної сталості, які офіційно застосовуються в ЄС.

Враховуючи особливе занепокоєння з приводу впливу ресурсних галузей на екологічну деградацію навколишнього природного середовища та зміну клімату, наше дослідження сфокусовано на ланцюгах гірничої (залізорудної) промисловості та чорної металургії. В даний час є достатньо підтверджень того, що ці галузі є найбільшими забруднювачами довкілля, проте в Україні ситуація в них мало змінюється з часом [8; 17-20]. При вивченні синергетичних впливів насамперед бралися до уваги такі екологічні показники, як інтенсивність забруднення (промислові викиди / парникові гази), ресурсоемність виробництва та управління відходами (скорочення / запобігання, рециклінг та повторне використання). Підстави для обмеження рамок аналізу виходять зі звітів самомоніторингу України за 2020-2022 роки, які виявляють відсутність суттєвої динаміки та нестабільність прогресу з виконання Завдання 12.1: Зниження споживання ресурсів в економіці, Завдання 12.4: Скоротити кількість генерації відходів, збільшити рециклінг та повторне використання, Завдання 13.1: Обмежити викиди парникових газів в економіці.

Для виконання дослідження проведено огляд академічних, інституційних та офіційних статистичних ресурсів. Пошук літератури обмежується статтями англійською, німецькою та українською мовами, які відбиралися методом контент-аналізу.

## **1.2 Розвиток теорії глобальних ланцюгів створення вартості**

Зазначимо, що сучасне розуміння глобальних ланцюгів створення вартості розвивалося поступово. До науковців, яких можна вважати засновниками теорії глобальних ланцюгів створення вартості, напевно, насамперед відносяться М. Портер, Г. Джерефф, А. Томпсон і А. Дж Стрікленд, Р. Каплінські і М. Морріс та К. Прахалад. В трудах українських вчених, зокрема Н. Гахович, Г. Дугінець, Р. Зварича, А. Ігнатюк, М. Кизими, Н. Резнікової та інших, велика увага приділяється вивченню кліматичних аспектів участі України в глобальних ланцюгах створення вартості.

За сучасною науковою концепцією глобальний ланцюг створення вартості (*англ.* Global Value Chains, GVCs) розуміється як система послідовних логістично-виробничих відносин суб'єктів підприємницької діяльності, кожен з яких має певні функції у створенні продукту чи послуги для кінцевого споживання та збільшує додаткову вартість вхідних ресурсів, отриманих від попередніх учасників; також хоча б деякі з учасників ланцюгу виконують діяльність в різних країнах<sup>7</sup> [22].

Як бачимо, наведене визначення глобального ланцюгу створення вартості спирається на два первісних поняття. По-перше, розуміння цієї категорії вбирає в себе універсальні властивості ланцюгу створення вартості. За визначенням Майкла Портера, ланцюг вартості «збирається зсередини, але з дій, спрямованих зовні, пов'язуючи всіх учасників процесу створення вартості для задоволення віртуального кінцевого споживача» [23], Вгусе Когут доповнює, що він є «процесом, за допомогою якого технологія поєднується з матеріальними та трудовими ресурсами, потім результати збираються, продаються та розповсюджуються» [24].

По-друге, глобальний ланцюг створення вартості є утворюючим елементом міжнародної виробничої мережі, який через вертикальні та горизонтальні міжнародні взаємодії поєднує економічних суб'єктів різних країн уздовж процесу виробництва [25]. Але участь в GVCs передбачає не тільки міжнародні економічні зв'язки, а й функціональну інтеграцію компаній в стійкі системи створення доданої вартості, що розосереджені по різних країнам та регіонам [26-27]. Промислові товари та послуги з різних країн походження поступово нарощують додану вартість, поки не перетворюються на кінцеву продукцію для остаточного споживання.

---

<sup>7</sup>У літературі і міжнародних документах використовуються різні синонімічні підходи для опису цього процесу. Наприклад, звіт ЕСКАТО 2015 аналізує більше десяти варіантів визначень, що висвітлюють первісну сутність ланцюгу створення вартості, зокрема: «дроблення процесу» (*англ.* disintegration of process), «поділ виробництва» (*англ.* unbundling of production), «продуктова фрагментація» (*англ.* product fragmentation), «виробничі мережі» (*англ.* production networks) та інші. Серед цих паралелей кожен термін розкриває окремі контекстні області у дослідженні системи пов'язаних виробничо-логістичних процесів (див.: Asia-pacific Trade and Investment Report. Supporting Participation in Value Chains, ESCAP 2015 – <http://www.unescap.org/sites/default/files/Full%20Report%20-%20APTIR%202015.pdf>).



Як відомо, феномен GVCs набув найбільш цілісної і системної розробки в роботах американського вченого Гері Джереффі (англ. Gary Gereffi) [28], який в 1990 році запропонував цей інструмент для концептуалізації комерційних зв'язків у глобальній організації виробництва. Вчений ретельно вивчає характеристики глобального ланцюга створення вартості: (1) послідовність взаємозв'язків учасників глобального виробничо-торгового процесу; (2) сукупність певних етапів зі створення кінцевого продукту, на кожному з яких додається вартість; (3) кооперацію учасників з різних країн, кожен з яких має конкретну функцію у створенні сукупної вартості.

Спираючись на теоретичні положення Портера, Джереффі та їх послідовників, у великому спектрі наукових праць обґрунтовуються висновки, принципи та практичні рекомендації з питань збереження та протидії втратам створеної вартості уздовж виробничого ланцюгу, щоб забезпечити його ефективність і більш широкі інтереси, а саме підтримку соціальних, екологічних та інших викликів сталого розвитку.

Зокрема Akbar Zaheer та інші автори підтверджують, що методи управління в GVCs повинні відрізнятися від традиційних міжорганізаційних стратегій, які добре діють в умовах обмеженого ринку. Oliver Williamson показує, що у глобалізованому просторі навіть невеликі зміни в екологічній політиці деяких компаній та країн можуть надавати сильні синергетичні ефекти уздовж пов'язаних виробництв. Henk Akkermans та інші вчені вказують на існування «порочних циклів, які перешкоджають реалізації ефективних стратегій» і зменшують результати сталого розвитку у GVCs. Ian Colotla доводить, що ефективність управління на локальному рівні може суттєво залежати від проблем в глобальних ланцюгах та мережах. Neil M. Coe розмежовує поняття стратегічних ринкових зв'язків компаній, глобальних виробничих мереж і регіональних економік – останні керуються апаратом регіонального розвитку «через процедури створення, підвищення та захоплення вартості»<sup>8</sup>.

Узагальнюючи наукові здобутки, у 2005 році Джереффі в своїй знаковій роботі «Управління глобальними ланцюгами створення вартості» [28] запропонував рамковий підхід до управління процесами створення вартості в глобальному економічному просторі, де функціонують економіки з різним ступенем глобалізації та відкритості, мають дуже різний природно-ресурсний потенціал і екологічні проблеми.

---

<sup>8</sup>Див.: Zaheer, A., & Venkatraman, N. 1995. Relational governance as an interorganizational strategy: An empirical test of the role of trust in economic exchange. *Strategic Management Journal*, 16(5): 373–392; Williamson, O. E. (1996). The mechanisms of governance. Oxford University Press; Akkermans, H., Bogerd, P., & Vos, B. (1999). Virtuous and vicious cycles on the road towards international supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(5/6): 565–582; Colotla, I., Shi, Y., & Gregory, M. J. (2003). Operation and performance of international manufacturing networks. *International Journal of Operations & Production Management*, 23(10): 1184–1206; Coe, N. M., Hess, M., Yeung, H. W. C., Dicken, P., & Henderson, J. (2004). “Globalizing” regional development: A global production networks perspective. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 29(4): 468–484.



Вчений визначає чотири виміри організації управління GVCs, що важливі для з'ясування питань, де генерується додаткова вартість і як контролювати процеси її створення: (1) *Структура введення-виведення* – визначає послідовність базових зв'язків для створення доданої вартості; (2) *Територіальність* – характеризує стійке просторове охоплення пов'язаних діяльностей; (3) *Управління* – з'ясовує ролі головних учасників, що координують діяльність уздовж ланцюга; (4) *Інституційні рамки* – розкриває необхідну нормативно-правову основу для здійснення базових етапів процесу на місцевому, національному та міжнародному рівнях.

Також зазначимо, що, поряд з новим вектор розвитку концепції управління у GVCs, продовжуються гострі дискусії щодо достатності та ефективності їх екологізації в контексті завдань сталого розвитку. У численних наукових працях доводиться, що з метою віддзеркалення реальної економічної ролі країни треба в національних економічних рахунках враховувати шкоду від деградації довкілля і втрати природних багатств<sup>9</sup>. Цілком зрозуміло, що саме промислові компанії відіграють ключову роль у впровадженні екологічних і кліматичних завдань в GVCs.

У 2011 році, узагальнюючи накопичені знання, Майкл Портер і Марк Креймер переключають увагу у теорії ланцюгів додаткової (нової) вартості зі створення конкретних благ на створення спільних цінностей (*англ.* Creating Shared Value), які «тримають особливий ключ, що відкриває двері для наступної хвилі адекватних інновацій та відповідального зростання» [28]. Автори наполягають, що цінність кінцевого продукту (споживчої вартості) збільшується, коли процес створення вартості буде сталим на кожній ланці виробничого ланцюгу – від видобутку сировини до виробництва, розподілу, споживання, переробки та остаточної утилізації. Надалі цей тезис став провідним для низки інших теорій і концепцій, що стосуються питань управління сталим розвитком у промисловості. Тобто екологічну сталість, яка формується уздовж ланцюга створення вартості можна вважати самостійною цінністю, за яку споживачі (та суспільство) готови платити (див. рис. 1.1).

---

<sup>9</sup>Зокрема, в 1972 році Б. Нордхауз і Дж. Тобін запропонували показник «Міра економічного добробуту» (*англ.* Measure of Economic Welfare), що враховує збитки від екологічної шкоди і забруднення довкілля; показник став провісником більш складних оцінок сталого розвитку економік. Пізніше, в 1989 році, Герман Далі та Джон Кобб розробили «Індекс сталого економічного добробуту» (*англ.* Index of Sustainable Economic Welfare), що коригує ВВП, беручи до уваги витрати на протидію екологічній деградації і знецінення природного капіталу. Показник «Справжні заощадження» (*англ.* Genuine (Domestic) Savings) – запропонований Світовим банком у 1997 році, коригує ВВП і показує величину реальних національних заощаджень після належного обліку обсягів виснаження природних ресурсів і збитків від забруднення навколишнього середовища. В 2012 році Статистичним комітетом ООН був прийнятий міжнародний стандарт «Система еколого-економічного обліку» (*англ.* System of Environmental-Economic Accounting, SEEA), що передбачає узгодження у національних статистиках показників економічного обліку з системою показників навколишнього середовища і природних ресурсів [22, с. 174-177].

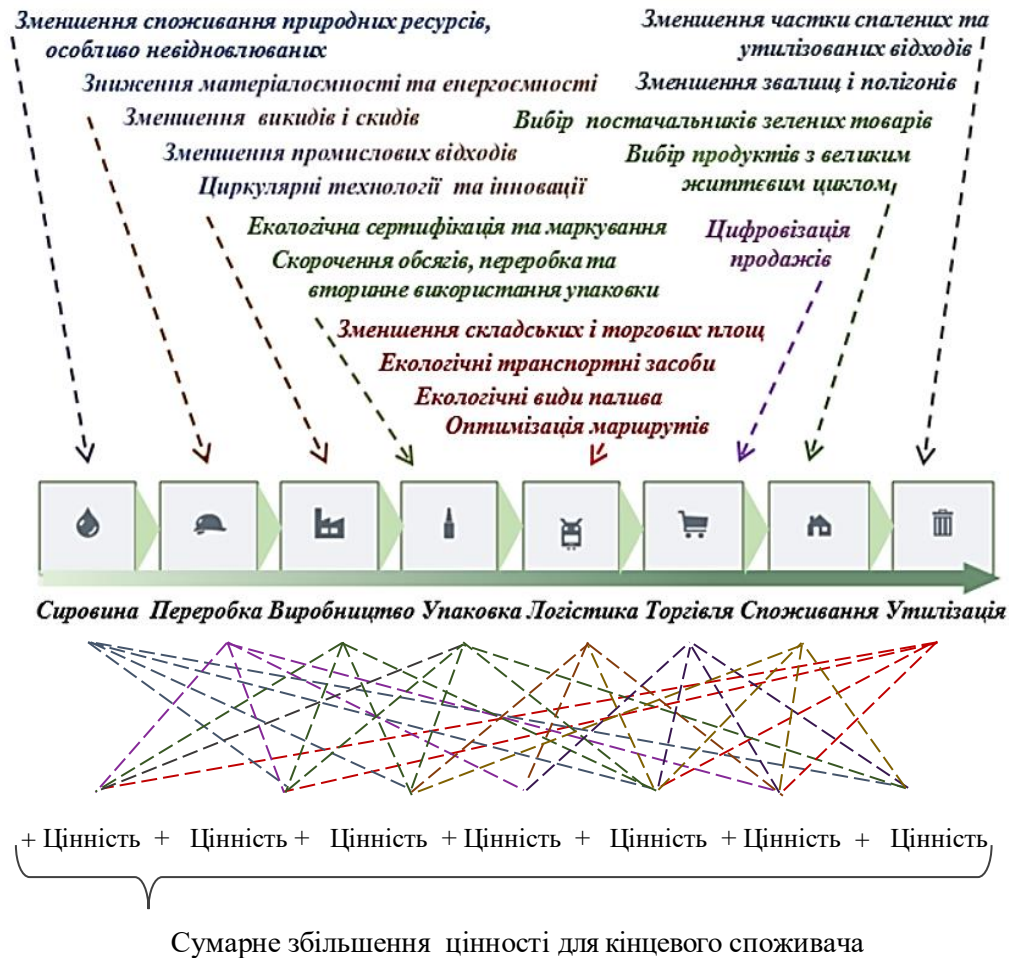
**Глава 1 Синергетичні ефекти екологічної сталості в глобальних ланцюгах створення вартості**



**Рисунок 1.1** – Зменшення цінності сумарної створеної доданої вартості через негативні екологічні впливи уздовж ланцюгів створення вартості  
(Джерело: розроблено авторами на основі [23; 25])

Можна стверджувати, що одночасне впровадження різних екологічних ініціатив пов'язаними компаніями (постачальниками, виробниками, перевізниками тощо) сприяє отриманню додаткових вигід від «зеленого» переходу внаслідок синергії, що діє на оточуюче бізнес середовище. Наприклад, добровільні стандарти зі сталого розвитку (VSS)<sup>10</sup> пропонують цільовим групам певний порядок дій, заходів та зобов'язань, що стимулюють прозорість і стійкість всього процесу постачань та закупівель, суттєво зменшують впливи на навколишнє середовище та клімат, формують нові ринки «зеленої» (сталого) продукції та відповідального споживача [29].

<sup>10</sup>Добровільні стандарти сталого розвитку (*англ.* Voluntary Sustainability Standards, VSS) – це комплекс загальних принципів, характеристик, правил і процедур, що рекомендовані для імплементації екологічних і соціальних цілей в систему створення вартості, враховуючи інтереси зацікавлених сторін, в тому числі майбутніх поколінь. На відміну від технічних регуляторів примусового виконання, VSS розробляються неурядовими організаціями і застосовуються виключно добровільно, щоб посилити екологічну і соціальну відповідальність суб'єктів підприємницької діяльності уздовж всього ланцюга створення вартості. VSS умовно поділяються на міжгалузеві і галузеві. Деякі з галузевих стандартів перетворилися в досить впливові рухи з посилення екологічної сталості на глобальному рівні. До таких, наприклад, відноситься система стандартів Лісової опікунської ради (*англ.* Forest Stewardship Council, FSC) та Морської опікунської ради (*англ.* Marine Stewardship Council, MSC), Ініціатива для забезпечення відповідальної розробки корисних копалин (*англ.* Initiative for Responsible Mining Assurance, IRMA) [22, с. 70-83].



**Рисунок 1.2** – Збільшення цінності сумарної створеної доданої вартості через впровадження програм екологічно сталого розвитку уздовж GVCs (Джерело: розроблено авторами на основі [23; 25])

Науковці (Surbhi Uniyal [3], Stefano Ponte [4], Mathieu Lamolle [30]) розглядають галузеві добровільні стандарти сталого розвитку об'єднуючим джерелом для збільшення створеної додаткової вартості і «накопичення зеленого капіталу» в певних GVCs. Також потужним інструментом збільшення цінності сумарної доданої вартості є програми циркулярних виробництв, що зменшують обсяги утилізації відходів і формують ринки рециклінгових матеріалів [31].

Треба підкреслити, що внаслідок останньої хвилі глобалізації ланцюги створення вартості сильно змінилися за довжиною, складністю, конфігурацією та якістю. Сьогодні ланцюги вартості часто охоплюють тисячі взаємопов'язаних компаній, їх продукти (окремі фрагменти виробництва) можуть перетинати кордони безліч разів, їх конфігурації обумовлені пошуком вигідних ресурсів по всьому світі.

У своїх дослідженнях Kokou Wotodjo Tozo & Jiong Gong [32] показали, що лише деякі ланцюги реалізують класичну послідовну структуру виробництва (*англ.* snakes value chains), більшість ринкових зв'язків є складною схемою входів-виходів проміжних продуктів (*англ.* spiders value chains). У складних ланцюгах проміжні продукти та послуги можуть безліч разів входити в будь-якій точці, де отримують додаткову вартість, щоб потім вийти для подальшого руху в будь-яких країнах світу.

Зрозуміло, що нелінійність, багатокomпонентність сучасних GVCs з величезною кількістю зворотних зв'язків ускладнюють управління екологічною сталістю. Водночас багато компаній, що мають сильні зв'язки в ланцюгах, намагаються обмежитися напівмірами, не приймають для себе «революцію екологічної ефективності» і її стратегічну цінність [1-2]. Планування розвитку без належної уваги до таких закономірностей веде до некоректного управління і провалам в досягненні ЦСР [33].

На такому фоні цікаво, що в останні роки знову повернулися дискусії, ставлячи під сумнів впливи сильних економік на екологічний стан. Зокрема, Paul Krugman у 2023 році опублікував в Нью-Йорк Таймс статтю «Чому зростання може бути зеленим?» (*англ.* Why Growth Can Be Green?), в якій намагається довести, що «економічне зростання є не таким загрозливим для екології, як ми думаємо»<sup>11</sup>. Timothée Parrique у статті-відповіді назвав такі «спалахи оптимізму» потенційно небезпечними для людства, нагадуючи, що будь-які впливи на навколишнє природне середовище (починаючи з видобутку, на рівні виробництва і т.д.) не повинні виходити за межі здатності екосистем до відновлення і порушувати екологічну рівновагу [34].

Отже, у своїх дослідженнях ми прийшли до висновків, що сучасні GVCs є нелінійною та багатокomпонентною системою виробничих зв'язків, що має безліч етапів, де створюється додаткова вартість та відповідно можуть формуватися негативні екологічні та кліматичні впливи з різною синергетичною силою. Ініціативи екологічно сталого розвитку, що охоплюють головних гравців уздовж GVCs, можуть збільшувати цінність сумарної створеної доданої вартості для кінцевого споживача та інших зацікавлених осіб, у тому числі майбутніх поколінь. Одночасно учасники такого «зеленого» переходу отримують додаткові вигоди внаслідок взаємної синергії.

Проте є питання «критичних точок» екологічного розвитку, тобто в яких відповідальна поведінка компаній (чи певних галузей у цілому) відкриває «вікна ефектів синергії» вгору та вниз по ланцюгу, можуть підвищують сукупну цінність створеної доданої вартості. У цьому процесі, очевидно, особливу важливість має перехід до моделей відповідального споживання та виробництва в галузях, які починають ланцюг і є найбільшими забруднювачами, тобто сировинних.

---

<sup>11</sup>Стаття Paul Robin Krugman викликала великий резонанс в науковому середовищі, оскільки автор в 2008 році отримав Нобелівську премію з економіки за розробку нової теорії торгівлі, тобто є впливовим науковим авторитетом з питань організації глобальних ринків.

### 1.3 Вплив української промисловості на екологічну сталість європейських ланцюгів створення вартості

Залежність рівня сталості GVCs від екологічної політики окремих учасників можна оцінити, розглядаючи промислові сегменти в національних економіках як ланки або «вузли» глобального виробничого ланцюгу. Зокрема, за даними World Mining Data<sup>12</sup>, у 2020 році Україна посіла 7 місце у світі з видобутку залізної руди. Того року загальний обсяг видобутку залізної руди склав 163,30 млн т, з яких 28,3% було експортовано. Загалом продукція гірничодобувної промисловості і металургії (руди, чорні метали та прокат) складає приблизно 20% експорту, тобто ці галузі беруть активну участь у глобальних ланцюгах створення вартості (див. табл.1.1).

**Таблиця 1.1** – Топ-10 експортних товарів України, 2018-2020 (Джерело: складено за UN Comtrade, 2020<sup>13</sup>).

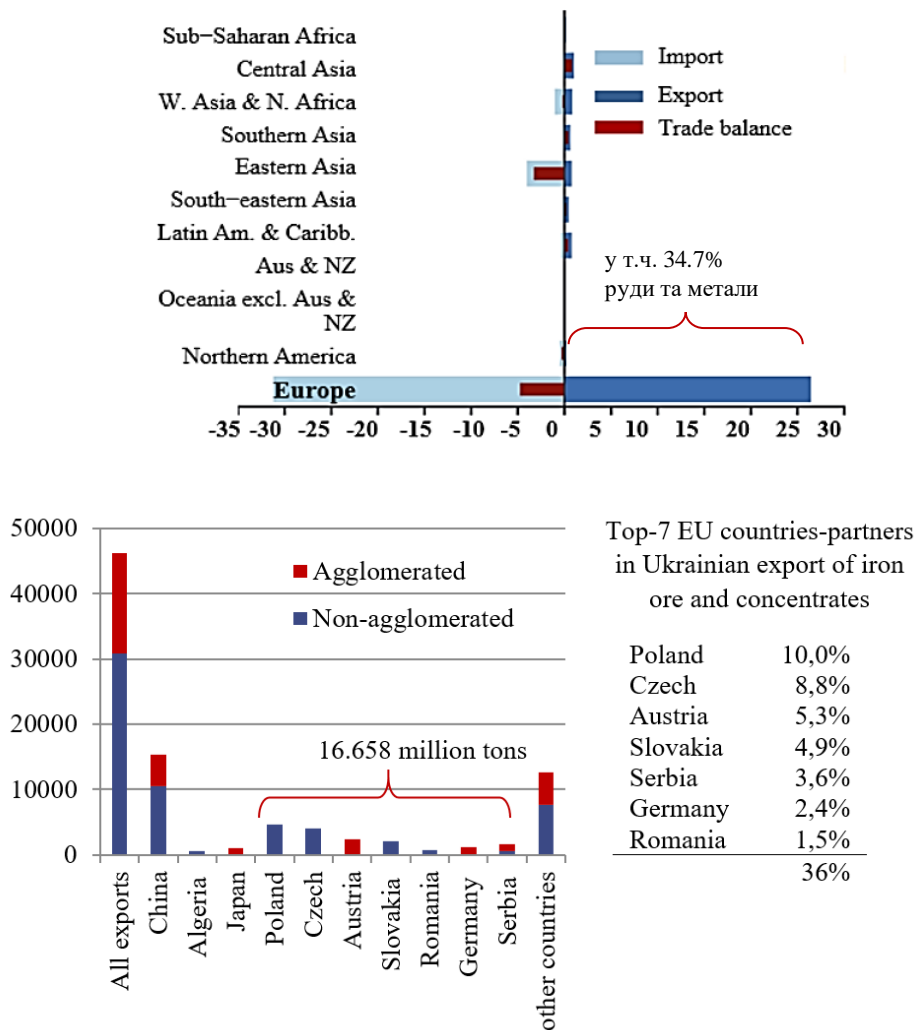
Код за ГС	Група товарів	Обсяг продажів (млн \$ USD)			%
		2018	2019	2020	
Усі групи товарів		47 334.7	50 054.4	49 230.8	100.0
1512	Олія соняшникова, сафлорова або бавовняна та їх фракції	4 113.4	4 273.5	5 319.9	10.8
1005	Кукурудза	3 506.1	5 218.3	4 885.1	9.9
2601	Руди та концентрати залізні, включаючи випалений пірит	2 869.0	3 397.8	4 239.3	8.6
1001	Пшениця, суміш пшениці і жита (меслин)	3 004.4	3 658.4	3 594.2	7.3
7207	Напівфабрикати з заліза або нелегованої сталі	3 002.9	2 860.0	2 746.4	5.6
7209	Прокат плоский з заліза або нелегованої сталі	2 193.1	1 943.8	1 599.2	3.2
8544	Проводи ізольовані (в т.ч. емальовані чи анодовані), кабелі	1 476.6	1 465.1	1 351.0	2.7
1205	Насіння ріпаку або кользи, подрібнене або неподрібнене	1 010.9	1 282.4	1 007.1	2.1
2306	Макуха та інші тверді відходи і залишки, одержані під час добування рослинних жирів і олії	921.4	1 012.4	1 177.8	2.4
7201	Чавун переробний та чавун дзеркальний у чушках, болванках або інших первинних формах	1 052.6	801.8	922.2	1.9

<sup>12</sup>Див.: World Mining Data – <https://www.world-mining-data.info/>.

<sup>13</sup>Див.: The United Nations Comtrade database – <https://comtradeplus.un.org/>.

**Глава 1 Синергетичні ефекти екологічної сталості в глобальних ланцюгах створення вартості**

Але саме ці галузі переважно призвели до таких низьких рейтингів країни за екологічними показниками в 2020 році: 89-те місце в рейтингу Environmental Performance Index (на основі 24 показників ефективності в десяти категоріях питань, що охоплюють стан довкілля та життєздатність екосистем); і 115-те місце в рейтингу ВВП на одиницю споживання енергії. Як бачимо з рис. 1.3, більше третини експорту залізної руди припадає на 7 європейських країн-імпортерів. Тобто Україна тим самим безпосередньо збільшує екологічний і вуглецевий слід європейських металургійних ланцюгів створення вартості, зокрема Польщі, Чехії, Австрії та інших імпортерів.



*Примітка:* без статистичних даних щодо тимчасово окупованих російською федерацією АР Крим та міста Севастополь, Україна.

**Рисунок 1.3** – Географічний баланс експорту-імпорту України, млрд \$ USD, 2020 р. (Джерело: [35] на основі даних Укрстату, 2021)



Ще у 2020-2022 роках українські гірничодобувні та металургійні підприємства зіткнулися з серйозними труднощами у своїй діяльності на європейському ринку. Більше 30 років України залежала від російського газу та використовувала старі технології, успадковані від радянського режиму. Але тепер, прагнучі до повної інтеграції в економічний і політичний простір ЄС, українська промисловість має дотримуватися вимог (екологічних, кліматичних та енергетичних), які висувуються до виробничих компаній ЄС. Цей перехід до відповідальних моделей виробництва та споживання спирається на гнучкий комплекс програм за Ukraine Facility Plan, що передбачає проведення низки реформ та трансформацій протягом 2024-2027 років.

Звісно, Ukraine Facility Plan має більш широкий контекст, ніж тільки допомога Україні у повосенній «зеленій» відбудові на шляху її вступу до ЄС. Створений механізм сприяє утриманню європейської економіки на траєкторії сталого розвитку в умовах екзогенних шоків – величезного потрясіння від наслідків війни проти України, що призвели до раптової зміни економічних умов і зачепили кожну державу Європи. Нагадаємо, що вже у березні 2022 року, одразу після початку російського вторгнення, Єврокомісія приймає план ЄС REPowerEU, що припиняє імпорт газу, нафти і вугілля від РФ. Згідно з даними Світового банку, хвилі економічного шоку у виробничих ланцюгах поширюються чотирма каналами: ланцюгами створення вартостей, товарними ринками, логістичними мережами та прямими іноземними інвестиціями<sup>14</sup>.

На рис. 1.4 показано результати моніторингу системи «Ecodozor», яка демонструє екологічні та економічні наслідки російської збройної агресії для промисловості України, зокрема на сході країни приблизно 47% підприємств, а на півдні 29% зазнали сильних пошкоджень або руйнувань. За звітом Світового банку (2023)<sup>15</sup>, найбільших збитків і втрат зазнала металургія, що в перший рік війни втратила близько 40% потужностей, зокрема зруйновані заводи-гіганти Азовсталь, ММК ім. Ілліча, а також Авдіївський коксохім. Величезне підприємство «АрселорМіттал Кривий Ріг», що спеціалізується на видобутку залізної руди та прокату, зупинилося 8 разів, але продовжує підтримувати свою діяльність.

Окрім руйнувань, підприємства мають проблеми з енергопостачання після російських обстрілів, порушення логістики через блокаду, рекордний дефіцит кадрів через мобілізацію та нестачу фінансів. Перебої в глобальних і регіональних ланцюгах постачання спричинили підвищення цін на всі ресурси. Масштабні впливи на довкілля стали загрозою впровадженню Європейського зеленого курсу в Україні.

---

<sup>14</sup>Див.: Michele, Ruta (2022). How the war in Ukraine is reshaping world trade and investment – <https://blogs.worldbank.org/en/developmenttalk/how-war-ukraine-reshaping-world-trade-and-investment>.

<sup>15</sup>Див.: Ukraine: Firms through the War (2023). The World Bank Group – <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099121623102526502/pdf/P177312004f79e06e0b22405be65b5db5b9.pdf>.

## Глава 1 Синергетичні ефекти екологічної сталості в глобальних ланцюгах створення вартості



**Рисунок 1.4** – Екологічні та економічні наслідки російської збройної агресії для промисловості України (Джерело: Екодозор<sup>16</sup>, станом на липень 2024 р.)

<sup>16</sup>Розробка та функціонування інформаційної системи «Екодозор» здійснюється за підтримки Zoі Environment Network (Швейцарія), координатора проекту ОБСЄ в Україні, гуманітарної ініціативи REACH та Програми ООН з навколишнього середовища. Система даних включає такі блоки: 1) Порушення промислових об'єктів, критичної інфраструктури та населених пунктів. На карті показано лише ті об'єкти, робота яких була порушена станом на дату моніторингу. 2) Екологічні ризики. Призначені рівні ризику враховують вид промислової чи іншої діяльності, характер і місце події та інші фактори. 3) Пошкодження ділянок. Потенційний збиток від збройних дій оцінюється для кожної території за часом та наближеністю (колишньою або теперішньою близькістю) до лінії фронту. 4) Природно-заповідні території. Інформація про охоронювані території береться з бази даних ProtectedPlanet UNEP-WCMC. 5) Лісові пожежі. Просторово-часовий аналіз проводиться за даними Регіонального Східноєвропейського центру моніторингу пожеж. 5) Базові шари. Дані отримуються із векторних картографічних даних із відкритою ліцензією OpenStreetMap та інформаційної супутникової системи Microsoft Bing. Конкретні ризики для повітря, поверхневих і ґрунтових вод, ґрунту, утворення відходів і здоров'я людей оцінюються для кожного інциденту на основі типу об'єкта, що постраждав, і характеру інциденту. Ризики викиду токсичних речовин у результаті інцидентів, пов'язаних із фізичним пошкодженням або руйнуванням об'єктів, оцінюються на основі ймовірної присутності токсичних речовин, які є найбільш поширеними для певних об'єктів відповідно до Інструменту оперативної екологічної оцінки UNEP-WCMC (див.: <https://www.ecodozor.org/index.php?lang=en>).

Вивчення результатів моніторингу Ecodozor, офіційних статистичних джерел та інформації неурядових екологічних організацій свідчить, що війна викликала і далі викликає величезні флуктуації в показниках екологічного стану навколишнього середовища України, зокрема забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водоймищ, підтоплення територій, виникнення пожеж та радіаційних небезпек (в тому числі в зоні відчуження ЧАЕС), погіршення екологічного стану агроландшафтів, знищення і пошкодження об'єктів природно-заповідного фонду тощо. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України повідомляє, що за два роки війни країна має 180 млн т викидів вуглецю – це приблизно стільки, як Мальта генерує за 80 років<sup>17</sup>.

Постійні бомбардування та обстріли міст і промислових об'єктів призвели до викиду великої кількості токсичних хімічних речовин у навколишнє середовище. Ці хімікати забруднили ґрунт, джерела води та повітря, спричиняють впливи на здоров'я місцевого населення. Бомбардування електростанцій та нафтопереробних заводів спричинило розливи і витоки нафти, радіоактивних речовин та інших небезпечних матеріалів, що завдало значну шкоду екосистемі. Наприклад, 9 лютого 2024 року влучання ударних дронів РФ по нафтобазі у Харкові створило локальну екологічну катастрофу, що зачепила усі три сфери екосистеми – воду, ґрунти й атмосферу. Понад 3 тисячі тонн нафтопродуктів потрапило до річок Харківщини<sup>18</sup>.

Але ще велику небезпеку несуть в собі підприємства, які й за мирних умов були джерелом великої небезпеки і шкідливих викидів. Зокрема, Миколаївський глиноземний завод сьогодні перетворився на справжню екологічну «бомбу». До війни завод був одним з найбільших виробників в Європі металургійного глинозему (сировини для виготовлення алюмінію). Понад 90% продукції експортувалося в Чехію, Грецію, Монако, Нідерланди, Іспанію, Угорщину тощо. Відомо, що завод був одним з величезних забрудників середовища в країні – викидав в атмосферу оксиди азоту і сірчистий газ, забруднював ґрунти свинцем, цинком, хромом та міддю. Непрацюючий вже третій рік завод став в рази небезпечнішим для навколишнього середовища. Екологічні загрози пов'язані з порушенням режиму нормальної експлуатації шламосховищ – 49 млн тонн відходів, що зберігаються на площі близько 400 гектарів. Зараз ми маємо неконтрольоване пиління червоного шламу зі шлакових полів підприємства, що негативно впливає на довкілля, а також здоров'я людей<sup>19</sup>.

---

<sup>17</sup>Див.: Сайт Міндовкілля України – <https://mepr.gov.ua/>.

<sup>18</sup>Див.: Влучання РФ у нафтобазу у Харкові – <https://suspilne.media/kharkiv/688654-vlucanna-rf-u-naftobazu-u-harkovi-so-pokazali-rezultati-doslidzenna-vodi/>.

<sup>19</sup>У травні 2021 року експерти з Київського науково-дослідного інституту судових експертиз Міністерства юстиції України виявили у відходах червоного шламу МГЗ низку небезпечних речовин (зокрема миш'як, кадмій, ртуть, свинець), що викликають рак та інші хвороби у людей – див.: <https://kp.ua/life/a633007-v-nikolaevskoj-oblasti-nachinaetsja-masshtabnaja-proverka-zdorovja-zhitelej-postradavshikh-ot-toksichnykh-otkhodov-nhz>.

Деякі процеси забруднення неможливо відстежити, особливо на тимчасово окупованих територіях. Наприклад, у Маріуполі на території Азовсталі зберігалася велика кількість хімічних речовин, необхідних для технологічних процесів – кислоти, аміак та інші. Після сотні тисяч снарядів, ракет і бомб експерти навіть приблизно не можуть порахувати, скільки з цих речовини потрапило до ґрунту та водних басейнів<sup>20</sup>.

До того ж на території України внаслідок російської збройної агресії на сьогодні утворилося сотні тисяч тонн будівельного сміття, його об'єми зростають з кожним новим російським ударом по містах та промислових об'єктах. Щоб будівельне сміття можна було повторно використовувати, його слід зробити безпечним. Зокрема, є проблема поводження з азбестовмісними відходами<sup>21</sup>. Постанова КМ України № 1073 «Про затвердження Порядку поводження з відходами, що утворилися у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель і споруд внаслідок воєнних дій, терористичних актів, диверсій або проведення робіт з ліквідації їх наслідків, та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України» вперше визначає особливості поводження з небезпечними відходами від руйнувань, зокрема з будь-якими азбестовмісними відходами.

Слід зазначити, що до війни Україна поки не мала такого досвіду, європейські екологічні норми взагалі дуже важко і повільно імплементувалися в українське законодавство. Наприклад, Закон України «Про систему громадського здоров'я», що, зокрема, заборонив виробництво і використання азбесту, був прийнятий 11.04.2023 р. і введено в дію з 11.02.2024 р. Тільки незадовго до війни почалася імплементация Регламенту ЄС 305/2011 «Будівельна продукція», що стосується вимог до якості та безпеки будматеріалів, але через війну введення цієї норми відкладено до 2025 року. Після 15 років спроб провести реформу контролю за промисловим забрудненням, 16 липня 2024 року ВР України нарешті ухвалила проект Закону «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення», яким встановлює новий формат діалогу держави, бізнесу та громадськості у питаннях зменшення промислового забруднення відповідно до вимог Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди.

---

<sup>20</sup>Див.: Як війна та знищення Азовсталі загрожує екології Приазов'я – <https://www.0629.com.ua/news/3380064/ak-vijna-ta-znisenna-azovstali-zagrozue-ekologii-priazova>.

<sup>21</sup>В Україні досі понад 70% дахів житлових і промислових будівель покриті хвилястими азбестоцементними плитами, азбестовмісні матеріали широко використовувалися в промисловості для протипожежного захисту, тепло- та звукоізоляції. В ЄС всі азбестовмісні матеріали остаточно були заборонені з 2005 року. Законодавством прописані особливі правила і процедури демонтажу будівлі, якщо в неї є азбестовмісні матеріали і вироби, а також сортування, транспортування та захоронення азбестовмісних відходів, щоб мінімізувати їхній небезпечний вплив на здоров'я та довкілля (див.: Біла книга щодо методології поводження з азбестовмісними матеріалами відповідно до нового законодавства в Україні, 2024 – [https://ic-consulents.com.ua/wp-content/uploads/2024/01/acm\\_white\\_paper\\_ukr.pdf](https://ic-consulents.com.ua/wp-content/uploads/2024/01/acm_white_paper_ukr.pdf)).



Відгуком на ситуацію в Україні стала хвиля публікацій із висловлюваннями, що війна посилює корозію GVCs – двигуна нарощування потенціалу сталого розвитку в Європі та іншому світі [36-37]. Напружені тривалі бойові дії на сході країни можуть призвести до критичного зменшення експорту заліза та виробів із заліза, інших металів тощо. Враховуючи геополітичні ризики, західні виробничі компанії можуть шукати інші країни чи регіональні можливості, повністю змінюючи існуючу конфігурацію виробничих зв'язків. Найімовірніше цей процес не призведе до миттєвого критичного падіння участі українських промисловців в GVCs. Але, борючись за своє майбутнє, важливо вже зараз наполегливо впроваджувати екологічні та кліматичні норми європейського права, готувати шляхи посилення позицій української промисловості в глобальних ланцюгах створення вартості.

#### **1.4 Висновки і рекомендації**

Встановлено, що посилення глобалізації докорінно видозмінило організацію GVCs; у сучасному стані вони набули форми мережових структур, у яких екологічні ініціативи мають синергетичний ефект. Впровадження певних екологічних і кліматичних стандартів стало не тільки конкурентною перевагою, а на європейському просторі – необхідністю, щоб отримати доступ до вигідних ринків та підвищити свою операційну ефективність, спираючись на результати інших компаній.

«Зелений» перехід в екологічно проблемних галузях сьогодні став об'єднуючим джерелом для підвищення цінності створеної додаткової вартості і запускає позитивний синергетичний ефект у процесах спільного накопичення «зеленого капіталу». Можна стверджувати, що екологічність взагалі перетворюється на товар. Кожен виробник та країна, що працює з дотриманням високих екологічних стандартів, розширює можливості для екологічного переходу та отримання додаткових соціальних і економічних вигід іншими учасниками вгору і вниз по виробничому ланцюгу. Більш того, дослідження доводить перехресну синергію екологічних норм, коли впровадження або невпровадження одних посилює або зменшує ефекти від впровадження інших екологічних норм.

Встановлено, що екологізація лише окремих ланок виробничого ланцюга не може надати повноцінного ефекту, оскільки екологічний і кліматичний слід передається покупцям вниз по ланцюгу. Це можна простежити на прикладі ланцюга «залізорудна промисловість – металургія – виробництво виробів зі сталі». Відповідальні моделі виробництва у ресурсних галузях запускають синергетичні ефекти, зокрема посилюють зацікавленість пов'язаних підприємств у співпраці на основі добровільних стандартів екологічно сталого розвитку, циркулярних моделей організації виробництва, стандартів енергозбереження, практик прозорості використання природних ресурсів.

## Список використаних джерел

- 1 Pavlychenko, A., Paliekhova, L. (2024). Achieving environmental sustainability in industrial value chains. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles. Ed.: A. Pavlychenko, L. Paliekhova.* Dresden, 15-21.
- 2 Palekhov, D., Palekhova, L. (2021). Environmental sustainability in achieving the sustainable production and consumption: challenges of a Post-Soviet transition economy. *Transposition of the Acquis Communautaire – Migration and Environment.* Umweltrecht in Forschung und Praxis 66. Verlag Dr. Kovač, Hamburg.
- 3 Uniyal, S., Mangla, S. K., & Patil, P. (2020). When practices count: Implementation of sustainable consumption and production in automotive supply chains. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 31(5), 1207-1222.
- 4 Ponte, S. (2020). Green capital accumulation: business and sustainability management in a world of global value chains. *New Political Economy*, 25(1), 72-84.
- 5 Conejo, A. N., Birat, J. P. & Dutta, A. (2020). A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. *Journal of environmental management*, 259, 109782.
- 6 Coe, N. M., Yeung, H. W. C. (2015). *Global production networks: Theorizing economic development in an interconnected world.* Oxford University Press.
- 7 Bratec, T., et al. (2019). Consideration of environmental and socio-economic aspects of a territory for sustainable production and consumption in a biorefinery context. *Universities and Sustainable Communities: Meeting the Goals of the Agenda 2030.* Springer, 47-60.
- 8 Palekhov, D. & Palekhova, L. (2019). Responsible Mining: Challenges, Perspectives and Approaches. *Sustainable Global Value Chains.* Published by Springer, 521-544.
- 9 Lund-Thomsen, P., et al. (2021). Global value chains and intermediaries in Multi-stakeholder initiatives in Pakistan and India. *Development and Change*, 52(3), 504-532.
- 10 Mangla, S. K., Govindan, K., & Luthra, S. (2017). Prioritizing the barriers to achieve sustainable consumption and production trends in supply chains using fuzzy Analytical Hierarchy Process. *Journal of cleaner production*, 151, 509-525.
- 11 Van Assche, A., Brandl, K. (2021). Harnessing Power within Global Value Chains for Sustainable Development. *Transnational Corporations Journal*, 28(3).
- 12 Калініченко, З. Д. (2023). Методологічні засади аналізу ланцюгів доданої вартості та участі України в міжнародній інтеграції. *Innovation and Sustainability*, № 1, 176-187.
- 13 Лутковська, С. М. (2020). Сутність системи екологічної безпеки сталого розвитку в умовах глобальної економіки. *Ефективна економіка*, №4, 10.
- 14 Коваленко, О. В., Бокій, О. В., & Ященко, Л. О. (2023). Концептуальні засади формування циклічних ланцюгів створення вартості в парадигмі циркулярної економіки. *Продовольчі ресурси*, 11(21), 223-237.
- 15 Палехова, Л. Л. (2021). Стратегія бенчмаркінгу для планування сталого розвитку підприємства у промислових ланцюгах створення вартості. *Економічний вісник Дніпровської політехніки*, 2021, №3.
- 16 Kano, L., Tsang, E. W., & Yeung, H. W. C. (2020). Global value chains: A review of the multi-disciplinary literature. *Journal of international business studies*, 51(4), 577-622.
- 17 Gorova, A., Pavlychenko, A., Borysovs'ka, O., & Krups'ka, L. (2013). The development of methodology for assessment of environmental risk degree in mining regions. *Mining of Mineral Deposits*, 207-209.
- 18 Palekhova L., Palekhov D. (2016). Conceptual framework for balancing economic growth and environmental sustainability at regional level. *Scientific Bulletin of National Mining University*, №1, 144-148.

19 Matukhno, E., Belokon, K., Shatokha, V., & Baranova, T. (2019). Ecological aspects of sustainable development of metallurgical complex in Ukraine. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(4), 671-679.

20 Amosha, O., Lyakh, O., Soldak, M., & Cherevatskyi, D. (2018). Institutional determinants of implementation of the smart specialisation concept: Case for old industrial coal-mining regions in Ukraine. *Journal of European Economy*, 17(3), 305-332.

21 Shatokha, V., & Matukhno, E. (2021). Climate change mitigation scenarios for the Ukrainian steel sector based on best available technologies deployment. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 8(2), 507-517.

22 Палехова, Л. Л. (2020). Управління сталим розвитком: довідник базових понять. Дніпро: НТУ «Дніпровська Політехніка», (332).

23 Porter, M., E. (1985). *Competitive advantage: creating and sustaining superior performance*. New York; Porter, M. E. (2011). *Competitive advantage of nations: creating and sustaining superior performance*. simon and schuster.

24 Kogut, B. (1985). Designing global strategies: Comparative and competitive value-added chains. *Sloan Management Review*, (pre-1986), 26(4), 15.

25 Палехова, Л. Л. (2016). Проблема інтеграції у глобальні ланцюги створення вартості. *Управління сталим розвитком в умовах перехідної економіки: монографія..* Дніпропетровськ-Коттбус: НГУ-БТУ, 315-324.

26 Duginets, G. (2018). *Global value chains: monograph*. Kyiv National University of Trade and Economics.

27 Lund, S., Manyika, J., Woetzel, J., et al. (2020). Risk, resilience, and rebalancing in global value chains. McKinsey Global Institute.

28 Gereffi, G., Korzeniewicz, M. (1990). Commodity chains and footwear exports in the semiperiphery, in *Semiperipheral States. World-Economy*, 45-68; Gereffi, G., Humphrey, J., Sturgeon, T. (2005). The governance of global value chains. *Review of International Political Economy*, 78-104.

29 Хансманн, Б., Палехов, Д. (2015). Добровільні стандарти сталого розвитку в глобальних ланцюгах постачання і створення вартості. *Управління сталим розвитком в умовах перехідної економіки: монографія.* Дніпропетровськ-Коттбус: НГУ-БТУ, 9-17.

30 Mathieu, L., et al. (2019). Future Role of Voluntary Sustainability Standards: Towards Generation 3.0? *Sustainable Global Value Chains. Natural Resource Management in Transition*. Vol. 2. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 267-288.

31 Швець, В. Я., Палехова, Л. Л., Палехов, Д. (2018). Адаптивний менеджмент для цілей циркулярної економіки. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування: зб. наук. праць. ДВНЗ «Піднепр. держ. академія буд-ва і архітектури». Серія: Створення високотехнологічних екокомплексів в Україні на основі концепції збалансованого (сталого) розвитку.* Дніпро, 207-212.

32 Tozo, K. W., & Gong, J. (2020). Impact of Global Value Chains on Wage in Snake and Spider Configurations: An Empirical Analysis based on WIOD Countries. *International Journal of Science and Business*, 4(4), 79-97.

33 Palekhov, D., Paliekhova, L. (2022). Vulnerability of global supply chains: Lessons from the COVID-19 pandemic. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles. Ed.: Shvets V., Paliekhova L.* Dnipro-Cottbus, 36-40.

34 Parrique, T. (2023). A response to Paul Krugman: Growth is not as green as you might think. *Business Administration*.

35 Paliekhova, L. (2024). Circular economy: measuring the material footprint *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles. Ed.: A. Pavlychenko, L. Paliekhova.* Dresden, 43-54.

## THE SYNERGISTIC EFFECTS OF ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY IN GLOBAL VALUE CHAINS

Artem Pavlychenko, Liudmyla Paliekhova\*

**Keywords:** global value chains, European value chains, environmental sustainability, industrial sector, Ukraine.

**The main objectives** of this study were to investigate the concept of global value chains, to reveal tendencies in the development of ‘global value chains’ theory, and to confirm the synergy of environmental sustainability in global value chains, to analyse the problem of entering the European value chains by Ukrainian companies, that export high-carbon products.

**Methodology.** Official documents, data from statistical services of Ukraine and the European Union, reports and research papers with regard to the subject of global value chains and climate issues in industry provided a theoretical and methodological basis for this study. In particular, the authors refer to the previous results of her own research in this field.

**Findings.** The concept of global value chains is considered as a system of sequential interactions between participants of production and supply processes, where each of them performs a certain function in the creation of a final product. It was revealed that in the current state, global value chains have greatly modified and acquired the form of network structures in which environmental initiatives have synergistic effects. Environmental initiatives in certain parts of the global value chain are becoming a competitive advantage and challenge for other players in the production chain. In addition, some environmental sustainability initiatives are becoming the norm in European space, creating pressure for other initiatives to be introduced, thereby increasing their effects.

**Conclusions and Recommendations.** The study has revealed that under the open market conditions українские companies must tackle the following issues: find their place and functions in the global value chains, ensure they compliance with the environmental requirements that are imposed on this industry in the value chain, and have environmental value which will be beneficial for the participants of value chains.

---

\***Artem Pavlychenko** – Dr. (Technical Science), Professor, Professor of the Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection, First Vice-Rector, Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: pavlichenko.a.v@nmu.one; <https://orcid.org/0000-0003-4652-9180>. **Liudmyla Paliekhova** – Cand. Sc. (Economic), Associate Professor, Professor of the Marketing Department, Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: Paliekhova.L.L@nmu.one; <https://orcid.org/0000-0003-0217-5755>.



## ГЛАВА 2

# ВІДПОВІДАЛЬНЕ СПОЖИВАННЯ І ВИРОБНИЦТВО В ПРОМИСЛОВОСТІ: ПРОБЛЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ПРОГРЕСУ В ДОСЯГНЕННІ ЦІЛІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ 12

**Людмила Палєхова\***

**Анотація.** Дискусія присвячена двом основним напрямам: 1) дослідження історичних етапів формування концепцій та глобальних дій, що мають особливе значення для втілення ідеї зеленого розвитку промислового сектора; 2) аналіз методологічних проблем щодо вимірювання комплексного досягнення ЦСР 12 в Україні, враховуючі завдання Плану Ukraine Facility на 2024-2027 роки, розробленого сумісно з Єврокомісією для повоєнного відновлення української економіки на засадах Європейського зеленого курсу. Дослідження доводить, що між європейськими та українськими оцінками досягнення ЦСР 12 існують великі методологічні відмінності, що в майбутньому може стати бар'єром для доступу українських промислових компаній на європейський ринок. Національні індикатори ЦСР 12 мають бути максимально наближені до системи Євростату, яка задає акценти і є єдиною для моніторингу впровадження відповідального споживання і виробництва в країнах ЄС.

**Ключові слова:** сталий розвиток, екологічна сталість у промисловості, ЦСР 12, відповідальне споживання та виробництво, вимірювання екологічної сталості.

### 2.1 Вступ

Протягом останніх десятиліть проблеми екологічної кризи та протидії змінам клімату стають все більш важливим предметом уваги в рамках глобальної концепції сталого розвитку. Ряд зустрічей високого рівня, регіональні форуми та інші багатосторонні проекти ініціювали публічні дискусії з пошуку ключових підходів до посилення балансу між економічним зростанням та відповідальністю за екологію. У вересні 2015 року Генеральна Асамблея ООН ухвалила резолюцію «Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку на період до 2030 року», яка сформулювала контекст принципових змін економічної поведінки в усіх галузях економічної діяльності. ЦСР 12 «Відповідальне споживання та виробництво» оголошена фокусом зусиль з широкої екологізації економічного зростання, що одночасно охоплює два головних напрями зусиль – зниження ресурсоемності економік та забезпечення екологічної безпеки.

---

\*Палєхова Людмила Львівна – канд. екон. наук, доцент, професор кафедри маркетингу, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна. E-mail: Paliekhova.L.L@ntu.one; <https://orcid.org/0000-0003-0217-5755>.

ЦСР 12 вимагає комплексного набору дій для адаптації та справедливого переходу до сталих практик споживання і виробництва, що передбачає створення передового технологічного потенціалу, ефективного використання ресурсів і зменшення глобальних відходів. Усвідомлюючи нову реальність, Єврокомісія приймає у 2019 році Європейський зелений курс (*англ.* European Green Deal), а пізніше Оновлену промислову стратегію – 2020: Зміцнення єдиного ринку для відновлення Європи, що включає послідовне впровадження низки заходів з метою прискорення «зеленого переходу» та цифрової трансформації промисловості.

Восьма Програма дій ЄС з довкілля до 2030 року визначає шість пріоритетних завдань, зокрема: скорочення викидів парникових газів до 2030 року та кліматичної нейтральності до 2050 року; посилення адаптаційних можливостей до зміни клімату; відокремлення економічного зростання від використання ресурсів і погіршення стану довкілля, а також перехід до циркулярної економіки; впровадження цілей нульового забруднення; захист, збереження та відновлення біорізноманіття; зменшення тиску на довкілля та клімат, пов'язаного з виробництвом і споживанням<sup>1</sup>.

Розпочата у лютому 2022 року військова агресія РФ проти України стала серйозним випробуванням для безпеки та перешкодою «зеленому переходу» не лише для українців, але й Європи. Війна принесла геополітичну невизначеність на шляху до вуглецевої нейтральності економіки ЄС. У своїй промові 27 лютого 2022 року канцлер Олаф Шольц назвав загарбницьку війну Росії «Zeitenwende» – поворотним моментом, що несе історичні наслідки і виклики для Німеччини та Європи<sup>2</sup>.

Сіючи хаос у виробничих та логістичних зв'язках, викликаючи дефіцити на сировину, енергоносії та продукти харчування, війна в Україні стала загрозою у траєкторії глобального сталого розвитку, зупинила три десятиліття успіхів Європи на шляху до відповідального споживання та виробництва. Незважаючи на масштаб і складність завдання, Україна планує якісний стрибок у післявоєнному відновленні промисловості, впроваджуючи Європейський зелений курс, щоб здійснити зелені трансформації та повністю інтегруватися в єдиний ринок ЄС.

---

<sup>1</sup>Восьма Програма дій Європейського Союзу з довкілля (*англ.* The 8th Environment Action Programme, EAP), що набула чинності 2 травня 2022 року, є юридично узгодженим спільним порядком денним екологічної політики ЄС до 2030 року. Комісія за підтримки Європейського агентства з навколишнього середовища (EEA) та Європейського хімічного агентства (ECHA) здійснює моніторинг, оцінку та звітує щорічно про прогрес у досягненні пріоритетних цілей щодо «зеленого переходу» (див.: Monitoring report on progress towards the 8th EAP objectives 2023 edition. European Environment Agency, 2023).

<sup>2</sup>Цитата: «Wir erleben eine Zeitenwende. Und das bedeutet: Die Welt danach ist nicht mehr dieselbe wie die Welt davor» (Reden zur Zeitenwende. Bundeskanzler Olaf Scholz, 2022 – <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/992814/2131062/78d39dda6647d7f835bbe76713d30c31/bundeskanzler-olaf-scholz-reden-zur-zeitenwende-download-bpa-data.pdf>).

*Аналіз останніх публікацій.* Загалом кількість наукових досліджень, що стосуються питань екологічно сталого розвитку промисловості, за роки війни значно зросла. Наприклад, Google Scholar за 2023-2024 роки з цієї тематики знаходить понад 18,8 тисяч публікацій англійською; з них 4,4 тис. присвячені проблемам української промисловості<sup>3</sup>. Вивчення публікацій західних та українських науковців підтверджують наступні вихідні позиції, які ми приймаємо у своєму дослідженні.

По-перше, вчені згодні, що прискорення глобалізації докорінно змінило вимоги до економічної діяльності в напрямку значно більшої інтеграції та розширення рамок екологічної відповідальності [1-5]. Так, Lin Zhang [1] стверджує, що зелена економіка стала критично важливою політичною основою для зростання та розвитку в розвинутих країнах і країнах, що розвиваються. З цієї точки зору Isabel B. Franco & Lance Newey [3] вважають за необхідне просувати нову теорію ведення бізнесу, яка будується на принципах зеленого виробництва.

По-друге, підтверджується, що зменшення доступності природних ресурсів у поєднанні з проблемами зміни клімату збільшило тиск на ресурсну промисловість та запускає потужний синергетичний ефект у взаємних вимогах щодо зменшення вуглецевого сліду та запобігання утворенню відходів [1-9]. Наприклад, Алла Горова, Артем Павличенко та інші вчені [6-7] демонструють проблему відповідального виробництва у вугільній промисловості. Alberto Conejo [8] досліджує питання викидів та перспективи безвуглецевого майбутнього чорної металургії; Joshua O. Ighalo та інші [9] обговорюють екологічну сталість цементних підприємств; Gabriel Lopez [10] досліджує вуглецеві виклики для глобальної хімічної промисловості.

По-третє, розвивається тезис про вибір амбітної моделі зеленого відновлення України після війни. Зокрема, стратегія загальної відбудови економіки повинна мати чіткі критерії щодо сталості і відповідати кліматичним та екологічним політикам і стандартам ЄС. Оксана Кушніренко та інші [11] підкреслюють, що досягнення національних цілей зі сталого розвитку залежить від рушійних сил, що генерують промисловий сектор. Валерій Бондаренко та інші вчені [12] вважають за потрібне посилити екологічну функцію держави, яка повинна мобілізуватися для боротьби з екологічними викликами війни та відповідати європейському «зеленому» та цифровому порядку денному.

Водночас, враховуючи складність нових викликів для України, все ж залишається актуальним уточнення теоретичних і прикладних аспектів переходу до екологічно відповідальних моделей виробництва та споживання як основи відновлення української промисловості на принципах Європейської стратегії сталого розвитку.

---

<sup>3</sup>Станом на 23.05.2024 за словосполученням «Sustainable Development of Ukrainian Industry» Google Scholar за 2023-2024 роки знаходить 4,4 тис. публікацій англійською і всього 29 українською за словосполученням «сталий розвиток української промисловості».

*Мета дослідження.* Дослідження є спробою детального вивчення проблеми вимірювання ступеня екологізації промисловості України у форматі глобальних задач ЦСР 12, враховуючи завдання Європейського зеленого курсу, щоб зробити деякі висновки у контексті викликів повоєнного відновлення української промисловості.

*Методика дослідження.* Щоб зрозуміти «ключові точки», що важливі для формування екологічної сталості української промисловості, послідовно вивчаються три питання: 1) розвиток концепції та формування принципів відповідального споживання і виробництва; 2) порівняння стану досягнення ЦСР 12 в країнах ЄС і в Україні; 3) проблеми вимірювання динаміки виконання завдань ЦСР 12. Для здійснення дослідження проведено комплексний огляд академічних, інституційних та офіційних інформаційних ресурсів. Пошук літератури обмежується статтями українською, англійською та німецькою мовами, які відбиралися методом контент-аналізу.

## **2.2 Розвиток концепції екологічно відповідального споживання та виробництва**

Як відомо, до початку 70-х років питання природокористування розглядалися здебільшого як ресурсна основа нарощування темпів економічного розвитку. Але поступово стало очевидно, що більшість запасів природних ресурсів, які використовуються у виробництві, можуть бути вичерпані вже в найближчому майбутньому. В той же час серія екологічних катастроф продемонструвала серйозні наслідки неконтрольованої антропогенної діяльності, що викликало протести громадськості з вимогами посилення екологічної відповідальності бізнесу та влади<sup>4</sup>.

Всесвітнє визнання екологічних аспектів як основи економічного розвитку було вперше задекларовано Стокгольмською конференцією ООН з довілля у 1972 році. Можна стверджувати, що концепція екологічної сталості була започаткована сильним меседжем Стокгольмської декларації [5; 13-15]. Зокрема, принципи 2-6 мають вимоги щодо обмежень нераціонального використання природних ресурсів. Ймовірно, найголовніше положення Декларації стосується міжнародної відповідальності держав за шкоду навколишньому природному середовищу – принципи 21-22. Також розпочався активний діалог про відмінності екологічної відповідальності держав залежно від стану розвитку їхньої економіки та споживання. В результаті вперше на глобальному рівні декларується тезис, що розвинені країни мають надавати суттєву підтримку країнам, що розвиваються, доповнюючи їх власні зусилля з нарощування потенціалу екологічної сталості (преамбула, пункт 7; принципи 9-12, 20, 23).

---

<sup>4</sup>Наприклад, резонансним став величезний розлив нафти з платформи компанії Юніон Ойл біля Санта-Барбари (США), 1969 р. Катастрофа прискорила прийняття у 1970 році Закону США NEPA (англ. US National Environmental Policy Act), який вперше у світі зобов'язав органи влади проводити процедуру екологічної оцінки своїх планів та програм розвитку.

Необхідно розуміти революційність досягнень Стокгольмської конференції. Тоді стан суспільства сильно відрізнявся від сучасного, країни поділялися за ідеологічною ознакою – у Німеччині стояла Берлінська стіна, Чехословаччина була окупована радянськими військами, не закінчився процес деколонізації. Як відомо, СРСР та його союзники бойкотували Конференцію у Стокгольмі, що, можливо, надалі звузило глобальні процеси перетворень<sup>5</sup>. Незважаючи на це, Стокгольмський саміт послужив каталізатором поступовому формуванню природоохоронної політики в багатьох країнах, також й в соціалістичних [5].

Сьогодні вчені приходять до згоди, що загалом підсумкові Стокгольмські документи були сфокусовані більше на симптомах – місцевих і транскордонних екологічних проблемах, не визнаючи причину їх виникнення – відсутність екологічного збалансування моделі економічної розвитку [13-15].

Власне, поняття «сталий розвиток» вперше отримало офіційне визначення у «Всесвітній стратегії охорони природи», яка була підготовлена Міжнародним союзом охорони природи і природних ресурсів у 1980 році. У розділі I вказується: «Для того щоб розвиток був сталим, він має враховувати: соціальні і екологічні чинники нарівні з економічними; живі і неживі ресурси; довгострокові, так само як і короткострокові переваги, а також недоліки альтернатив дій». Треба змінити методи управління для того, щоб зберегти можливості відтворення ресурсів екосистем для справедливого задоволення потреб і задумів нинішніх і майбутніх поколінь [16].

Найбільш повно концепція сталого розвитку була обґрунтована у відомій доповіді «Наше спільне майбутнє» (або доповіді Брундтланд), опублікованої у 1987 році Всесвітньою комісією ООН з навколишнього середовища та розвитку [17]. Можна стверджувати, що принаймні дві ключові позиції Брундтланд – пріоритет задоволення основних потреб та ідея обмежень у споживанні природних ресурсів в інтересах майбутніх поколінь – у подальшому сформували ідеологічну платформу нового формату екологізації економічної активності та споживання [3; 18].

Пізніше Ріо-де-Жанейрська конференція 1992 року визнала концепцію сталого розвитку глобальною стратегією людства і прийняла Порядок денний на 21 століття – план дій на період до 2015 року, що включив вісім глобальних цілей сучасності. Декларація Ріо-де-Жанейро підтвердила принципи Стокгольмської декларації, посилила висновки Комісії Брундтланд та, серед іншого, запровадила ряд правових маркерів екологічної сталості економічної діяльності [19].

---

<sup>5</sup>Водночас є думка, що радянський тоталітарний уряд в будь-якому разі був би проти резолюції, яка вимагає від держав «надання інформації про дії чи події... щоб уникнути ризику значного несприятливого впливу на навколишнє середовище в районах за межами їхньої національної юрисдикції» (див.: The Soviets in the international environment: after Stockholm. Washington, August 11, 1972. Foreign Relations of the United States, 1969–1976, Volum. <http://history.state.gov/historicaldocuments/frus1969-76ve01/d328>).

Зазначимо, що низка принципів Декларації Ріо не мала аналогів в попередніх міжнародних документах. Так, принцип 3 декларує, що «право на розвиток має здійснюватися таким чином, щоб справедливо задовольняти потреби нинішнього та майбутніх поколінь у галузі розвитку та навколишнього середовища». Принцип 8 прямо визнає обов'язок держав скорочувати і усувати нестійкі моделі виробництва та споживання, щоб сприяти сталому розвитку та підвищенню якості життя. Принцип 13 вимагає «компенсації жертвам забруднення та іншої екологічної шкоди». Однак, незважаючи на чіткі мандати Декларації Ріо, реалізація багатьох принципів і досі залишається важкою невирішеною задачею для багатьох країн світу [13; 19].

Одночасно посилюються дискусії про те, як здійснити збалансований розвиток. В 1994 році в Осло відбувся Симпозіум зі сталого споживання (*англ.* Oslo Symposium on Sustainable Consumption), що прийшов до двох далекосяжних висновків: 1) сталість досягається, коли «зводиться до мінімуму використання природних ресурсів і токсичних матеріалів, а також викидів відходів і забруднюючих речовин протягом життєвого циклу послуги або продукту, щоб не поставити під загрозу потреби майбутніх поколінь»; 2) необхідне здійснення реформ в національних економічних політиках, щоб «товари та послуги відображали екологічні витрати і таким чином стимулювали більш сталі моделі виробництва та споживання»<sup>6</sup>.

Підтримуючи Декларацію Ріо та результати численних глобальних форумів, Декларація тисячоліття ООН (2000) підтверджує важливість зміни існуючих моделей виробництва та споживання, а також висловлює стурбованість з приводу перешкод, з якими стикаються на цьому шляху країни, що розвиваються (див. частину II, пункт 14). Пізніше, Йоганнесбурзький план, прийнятий у 2002 році на Всесвітній зустрічі з питань сталого розвитку, визначив, що впровадження відповідального виробництва є однією з трьох всеосяжних цілей сталого розвитку поряд з викоріненням бідності та збалансованим управлінням природокористуванням [4-5; 20].

На підтримку нових політичних рамок було реалізовано серію міжурядових та регіональних ініціатив, щоб надати багатосторонню допомогу менш розвиненим країнам, у тому числі з метою набуття ними певного досвіду. Відмітимо дві з них. Перша – це Регіональна ініціатива «Навколишнє середовище для Європи», що дуже вплинула на просування реформ в країнах з перехідною економікою у всій Європі<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup>Див.: <https://sustainabledevelopment.un.org/topics/sustainableconsumptionandproduction>.

<sup>7</sup>Процес «Навколишнє середовище для Європи» (*англ.* Environment for Europe) є унікальним партнерством держав-членів ЄЕК ООН, установ ООН, представлених у регіоні, інших міжурядових організацій, регіональних екологічних центрів, неурядових організацій та інших заінтересованих сторін. Загальні цілі процесу полягають у вирішенні екологічних проблем в регіоні та надання допомоги країнам Східної Європи, Кавказу та Центральної Азії (ВЕКЦА) та Південно-Східної Європи у підвищенні своїх стандартів до рівня аналогічних стандартів, що існують в іншій частині регіону (див. <https://unecce.org/environment-policy/environment-europe>).



Друга – так званий Марракешський процес, який було розпочато у 2003 році UNEP спільно з UN DESA. Зокрема, в рамках Марракешського процесу були створені тематичні цільові групи з метою поширення відповідних знань та передового досвіду у галузі сталого споживання та виробництва, кожна з яких керувалася однією з країн, що мала найбільш прогресивні успіхи у вирішенні цих питань<sup>8</sup>.

На Всесвітній конференції зі сталого розвитку «Ріо+20» у 2012 році зроблено висновки, що, незважаючи на деякі успіхи, прогрес з впровадження принципів зеленого виробництва все одно є дуже недостатнім і нерівномірним, у тому числі обмежується лише деякими промисловими галузями та секторами економічної діяльності. Результати обговорення спонукали глав держав прийняти 10-річну рамкову програму просування моделей сталого споживання та виробництва – 10YFP. Програма покликана полегшити доступ до знань про моделі сталого споживання та виробництва, а також сприяти наданню різної допомоги країнам, що розвиваються, з метою прискорення їх інтеграції в світову економіку екологічним чином.

Саміт ООН зі сталого розвитку 2015 року приймає Порядок денний на період до 2030 року, що викладає 17 Цілей у галузі сталого розвитку та 169 завдань, які носять комплексний характер у забезпеченні усіх трьох сфер розвитку – економічної, соціальної та екологічної. Зазначимо, що на відміну від Порядку денного на 21 століття нова програма дій приділила велику увагу питанням трансформації економічної діяльності. При тому, що стало новим меседжем, документ анонсував об'єднуючу місію ЦСР 12 «Відповідальне споживання та виробництво», закріпивши окреме цільове завдання (12.1) по 10YFP, що просуває її реалізацію [21].

Тобто ЦСР 12 «Відповідальне споживання та виробництво» визнається трансверсальною основою<sup>9</sup>, що вимагає міжгалузевого і наскрізного підходу, оскільки зміни моделей виробництва та споживання стосуються усіх завдань сталого розвитку на будь-якому рівні управління розвитком – підприємства, галузі чи території.

---

<sup>8</sup>Наприклад, було створено такі Цільові групи: Співпраця з Африкою – під керівництвом Німеччини; Сталі продукти – під керівництвом Великобританії; Сталий спосіб життя – під керівництвом Швеції; Сталі державні закупівлі – під керівництвом Швейцарії; Сталий туризм – під керівництвом Франції; Стале будівництво – під керівництвом Фінляндії; Освіта для сталого споживання – під керівництвом Італії (див.: UNEP Report 2009 Frequently asked questions: the Marrakech process. Towards a 10-Year Framework of Programmes on Sustainable Consumption and Production).

<sup>9</sup>В даному контексте трансверсальність означає набір наскрізних зв'язків ЦСР 12 з комплексом інших завдань сталого розвитку, що повинно братися до уваги при формуванні реляційної системи управління розвитком. Трансверсальність ЦСР 12 посилює синергію та передбачає раціональні компроміси в системі наскрізно пов'язаних управлінських рішень. Термін трансверсальний (*лат. transversus* – «поперечний») у своєму функціональному контексті запозичений з математичних наук, що описує можливості наскрізного перетину різних за своєю сутністю просторів / множин; протилежний терміну «дотичний».



В грудні 2019 року Європейський Союз прийняв «Європейську зелену угоду» (англ. European Green Deal, EGD), яка є невід’ємною частиною загальної стратегії Євросоюзу щодо реалізації Порядку денного ООН до 2030 року. EGD включає прийняття низки стратегій – промислової стратегії, плану дій з питань циркулярної економіки, реформи в будівельному секторі, стратегії розвитку морської вітроенергетики, стратегії щодо хімічних речовин, стратегії щодо біорізноманіття, стратегії управління лісами. Відповідно у березні 2020 року ЄС приймає нову промислову стратегію, яка будується на завданнях ЦСР 12 – прискорення зеленої трансформації, декарбонізація виробництва і зменшення утворення відходів.

Таким чином, ми приходимо до висновків, що процес еволюції концепції екологізації економічної діяльності можна умовно поділити на чотири історичних періоди кожен із яких суттєво вплинув на розуміння актуальних задач щодо трансформації моделей управління розвитком промисловості, а саме:

(1) 1970-1980 рр. – *прийняття принципів екологізації економічного розвитку*. Принципи, що були сформульовані Стокгольмською декларацією, а потім уточнені і доповнені Ріо-де-Жанейрською декларацією, є основою сучасної стратегії екологічного розвитку і промислової політики Євросоюзу, України та інших країн світу.

(2) 1980-1992 рр. – *формулювання концепції сталого розвитку*. «Всесвітня стратегія охорони природи», що була запропонована МСОП у 1980 році, та доповідь Комісії Брундтланд «Наше спільне майбутнє» від 1987 року містять чіткі політичні установки для управління сталим розвитком, в першу чергу це стосується методів екологізації економічної діяльності, зокрема встановлення обмежень у споживанні природних ресурсів, врахування екологічних інтересів зацікавлених сторін та нарощування сумісного потенціалу екологічної сталості.

(3) 1992 - 2000 рр. – *визнання стратегії сталого розвитку як глобальної моделі розвитку суспільства*. У цей період підписується низка стратегічних глобальних угод (Конвенція про біологічну різноманітність, Рамкова конвенція про зміну клімату, Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості у процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля, та інші), які зобов’язали країни впроваджувати законодавство, що стосується конкретних аспектів екологічної сталості, а також знайшли втілення у Європейській стратегії розвитку промисловості.

(4) з 2000 року – *програмування нарощування потенціалу сталого розвитку*. Цей період ознаменувався впровадженням практики прийняття глобальних програмних документів ООН на кожні 15 років, які містять конкретні цілі, задачі і показники з вимірювання їх виконання. Порядок денний на період до 2030 року відрізняється тим, що ЦСР 12 «Відповідальне споживання та виробництво» була визначена базовою основою для реалізації всього комплексу завдань з досягнення сталості розвитку на будь-якому рівні управління розвитком – підприємства, галузі чи території.

### 2.3 Порівняння досягнень з виконання ЦСР 12 у Європі та Україні

Як було показано, економічне зростання, що спирається на завдання ЦСР12, вимагає великих національних зусиль. Рамкова програма 10YFP (з прискорення переходу на зелені моделі сталого споживання та виробництва) враховує те, що далеко не всі країни, особливо з перехідною економікою, мають достатній економічний і технологічний потенціал для вирішення цієї проблеми, що відрізняється величезним діапазоном, глибиною і складністю комплексу завдань і показників [22-25].

І тим не менш, аналіз щорічних звітів Євросоюзу щодо виконання Порядку денного до 2030 (за 2019-2023 роки) дозволяє помітити дві цікаві тенденції. По-перше, наскільки розвинені економіки (країни з рівнем доходу вище середнього та високим рівнем доходу) відрізняються від слабких економік (Болгарії і України) в загальному прогресі по ЦСР, і це головним чином пов'язано з соціальними показниками, зокрема по ЦСР 1 «Ліквідація бідності», ЦСР 2 «Ліквідація голоду», ЦСР 3 «Гарне здоров'я і благополуччя» та ін. Але, виходячи за рамки загального індексу ЦСР, розкриваються протилежні результати щодо виконання завдань ЦСР12 (див. табл. 2.1) [5]. По-друге, серед європейських країн найбільш слабкі економіки, такі як Україна та Болгарія, мають передові позиції в досягненні ЦСР 12, але країни з розвинутою економікою різко відстають в цьому відношенні (див. рис. 2.1).

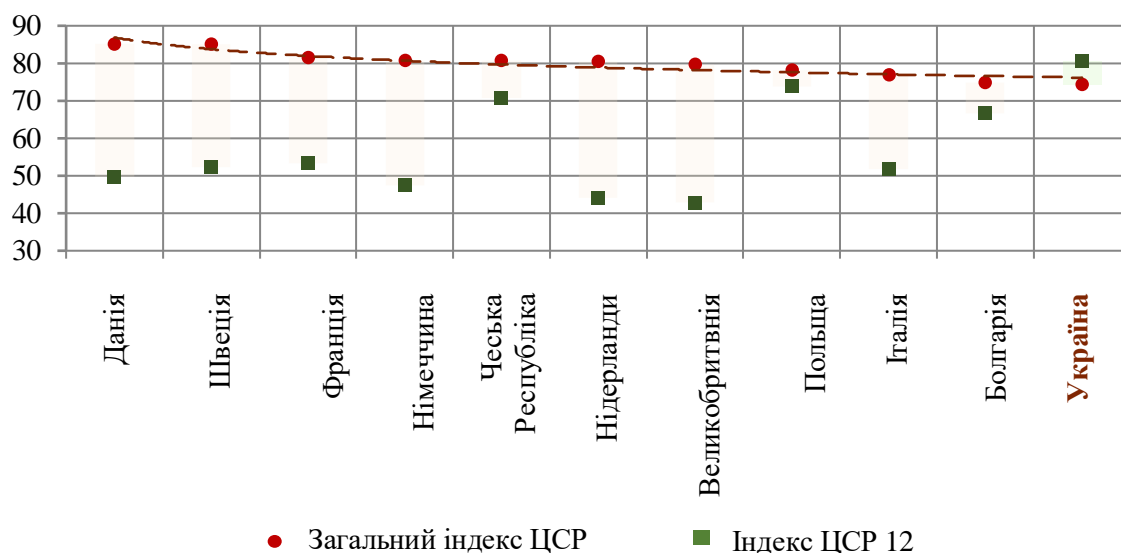


Рисунок 2.1 – Розриви в досягненнях по загальному індексу ЦСР і індексу ЦСР 12, вибірка з країн Європи, 2020 (Джерело: [5])

**Глава 2 Відповідальне споживання і виробництво в промисловості:  
проблеми вимірювання прогресу в досягненні Цілі сталого розвитку 12**

**Таблиця 2.1** – Порівняння досягнень країн ЄС і України по ЦСР 12, 2020  
(Джерело: [5])

Країна	Прогрес по ЦСР <sup>a)</sup>		Матеріальний слід <sup>b)</sup>		Показники екологічної сталості <sup>c)</sup>						
	Загальний індекс ЦСР		Індекс ЦСР12	на душу населення	Глоб альн. інд., %	ВВП на одиницю споживання енергії		Індекс екологічної ефективності, ЕРІ		Екологічні сертифікати ISO 14001	
	Оцінка	Ранг				Оцінка	Оцінка	Оцінка	Ранг	Оцінка	Ранг
Данія	85.2	1	49.8	24.3	0.28	15.6	13	81.6	3	3.9	28
Швеція	85.0	2	52.2	24.0	0.31	9.7	57	80.5	5	9.3	7
Франція	81.5	4	53.4	21.7	2.06	10.3	46	84.0	2	2.2	46
Німеччина	81.1	6	47.4	22.0	3.11	11.6	34	78.4	13	2.4	41
Чеська республіка	80.7	7	70.8	19.7	0.31	7.8	79	67.7	32	11.7	3
Нідерланди	80.4	9	44.0	26.3	0.64	10.9	42	75.5	18	3.0	3
Великобританія	79.4	13	42.9	22.2	2.16	14.7	14	79.9	6	6.0	19
Польща	75.9	29	73.7	17.0	0.84	9.7	57	64.1	46	2.6	39
Італія	75.8	30	51.7	19.6	1.75	13.5	18	77.0	16	6.3	17
Болгарія	74.5	36	66.6	12.3	0.20	6.8	88	67.9	29	11.9	2
<b>Україна <sup>d)</sup></b>	72.8	41	80.4	11.7	0.18	3.4	115	52.9	89	0.6	80

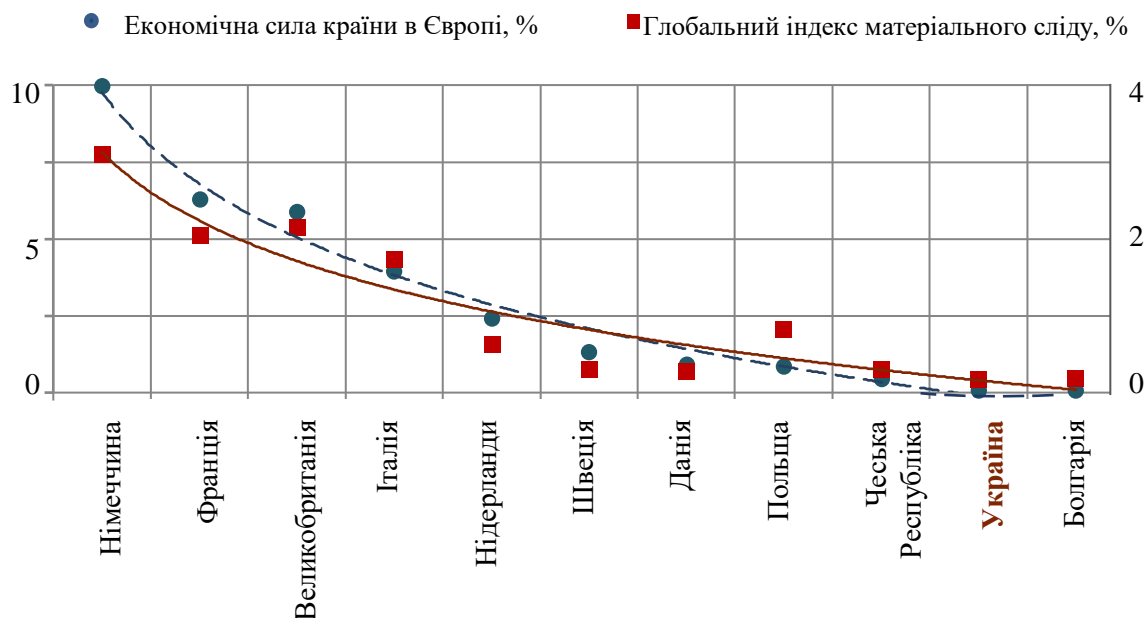
<sup>a)</sup> *Методологія:* Дані взято з Глобального звіту ООН про сталий розвиток 2020 (UN SDGs 2020).

<sup>b)</sup> *Методологія:* Матеріальний слід – це сума матеріального сліду для біомаси, викопного палива, металевих руд і неметалевих руд. Цей показник розраховується як сировинний еквівалент імпорту плюс внутрішній видобуток мінус сировинний еквівалент експорту на душу населення. Вихідні дані взяті з UNEP: 12.2.1 Матеріальний слід (UNEP 2016). Дані глобального матеріального сліду країн (у відсотках), взяті з Global Resource Footprint of Nations (EXIOBASE 2014).

<sup>c)</sup> *Методологія:* Дані взято зі звіту WIPO про глобальний індекс інновацій (WIPO GIІ 2019). Цей аналіз використовує три показники: ВВП на одиницю споживання енергії (2010 PPP\$ на кг нафтового еквівалента), індекс екологічної ефективності (за 24 показниками ефективності в десяти категоріях питань, що охоплюють здоров'я навколишнього середовища та життєздатність екосистеми) і екологічні сертифікати ISO 14001 – кількість виданих сертифікатів відповідності стандарту ISO 14001 щодо систем управління навколишнім середовищем.

<sup>d)</sup> Дані по Україні не включають тимчасово окуповану територію Автономної Республіки Крим та міста Севастополь.

Тим не менш, ситуація не така однозначна. Можна помітити, що чим вище внесок країн в економіку регіону, тим вище їхня частка в глобальних показниках матеріального і енергетичного сліду (див. рис. 2.2–2.3).



\* Економічна сила країни розраховувалася шляхом множення ВВП країни (по ППС) на душу населення та її частки у загальному номінальному ВВП Європи, %

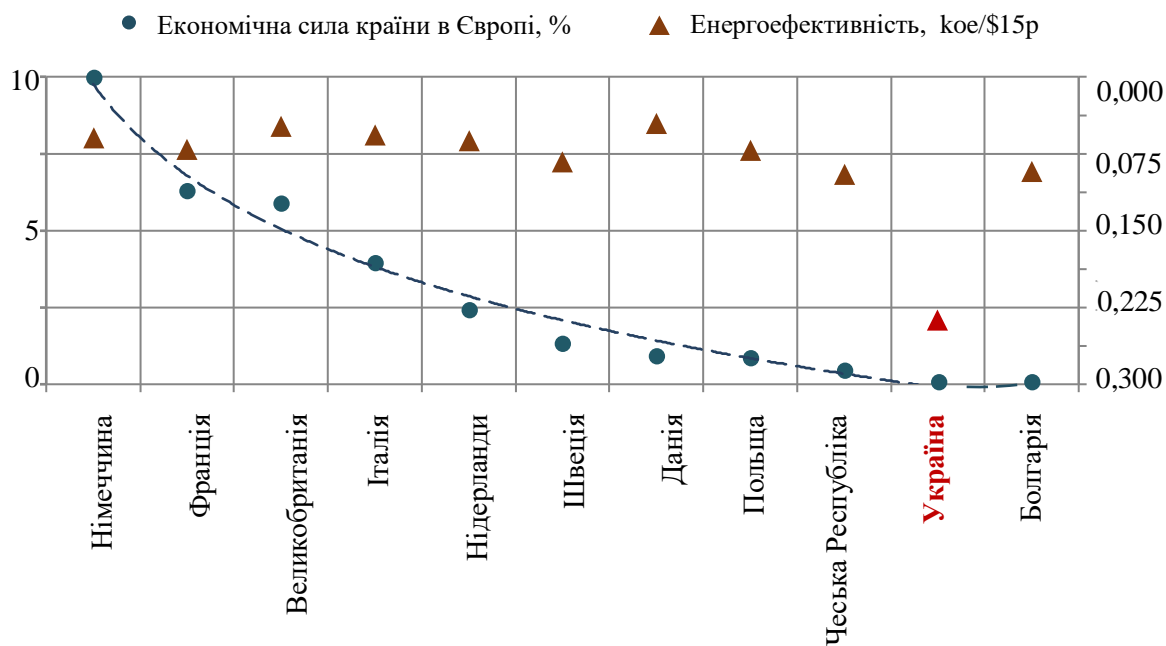
**Рисунок 2.2** – Розриви по показнику «Глобальний матеріальний слід»,  
вибірка з країн Європи, 2020 (Джерело: [5])

Як бачимо, найбільші економіки в Європі – Німеччина, Франція, Великобританія та Італія – мають високі значення по матеріальному сліду. Німеччина, яка є лідером за розміром свого внеску у європейське ВВП, має найбільший матеріальний слід, але при порівнянні матеріального сліду на одиницю вкладу в економіку регіону її вплив набагато нижче, ніж, наприклад, Великобританії чи Італії. Можна спостерігати найменші впливи країн з низькими економічними частками – України та Болгарії.

Ситуація пояснюється тим, що слабкі економіки у більшості є ресурсними, менше залучені до процесів створення доданої вартості і мають набагато меншу ступінь внутрішнього споживання первинних ресурсів. Ресурсні країни експортують свій матеріальний слід в розвинуті економіки, які мають високий відсоток переробного виробництва і створення доданої вартості<sup>10</sup> [4-5; 7].

<sup>10</sup>Див. більше доказів про це у главі 1.

Проте по показнику «Енергоефективність» країни мають менші розбіжності, незважаючи на їх частки у ВВП Європи (див. рис. 2.3). Як бачимо, найбільш енергоефективними є економіки Данії, Великобританії, Італії та Німеччини. Поряд з цим енергоефективність України у 3,5 рази нижче середнього рівня енергоефективності в Європі.



\*Економічна сила країни розраховувалася шляхом множення ВВП країни (по ППС) на душу населення та її частки у загальному номінальному ВВП Європи, %

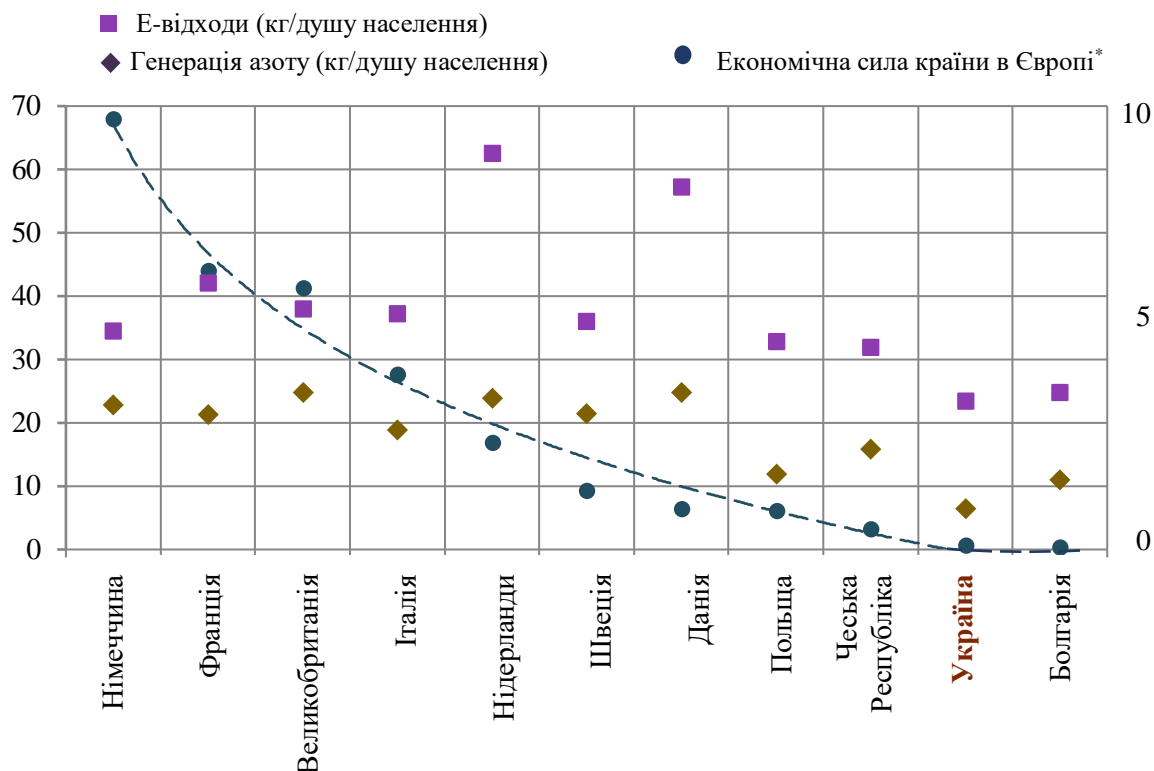
\*\*За даними Global Energy Transition Statistics: Energy intensity (кое/\$15р – кілограм нафтового еквівалента/долар ВВП у постійних цінах 2015 року, за паритетом купівельної спроможності)

**Рисунок 2.3** – Розриви по показнику «Енергоефективність»,  
вибірка з країн Європи, 2020 (Джерело: [5])

Результати ЦСР 12 по країнам стають більш зрозумілими, якщо поглянути на інструменти моніторингу прогресу, до яких належать лише дві групи показників – відходи та емсії<sup>11</sup> (див. рис. 2.4). Сильні економіки Європи генерують в середньому на душу населення більше 40 кг реактивного азоту і більше 20 кг електронних відходів, що вдвічі і більше, ніж в Україні. Що стосується інструментів екологічного менеджменту, в Україні сертифікація на відповідність стандарту ISO 14001 впроваджується переважно на великих підприємствах, що мають експорт [5].

<sup>11</sup>Див.: Глобальний звіт зі сталого розвитку, 2020 (UN SDGs 2020).

**Глава 2 Відповідальне споживання і виробництво в промисловості:  
проблеми вимірювання прогресу в досягненні Цілі сталого розвитку 12**



\*Економічна сила країни розраховувалася шляхом множення ВВП країни (по ППС) на душу населення та її частки у загальному номінальному ВВП Європи, %

**Рисунок 2.4** – Розриви в досягненнях показників «Екологічний слід», вибірка з країн Європи, 2020 (Джерело: [5])

Отже, аналіз щорічних звітів із моніторингу виконання цілей Порядку денного до 2030 показав, що оцінювання прогресу по ЦСР 12 поки слабо відбиває реальний стан екологізації економіки по країнам. Глобальні документи не розглядають слабкі економіки як найбільш вразливі з точки зору завдань ЦСР 12. Зокрема, Україна має високі результати по загальному індексу ЦСР 12, хоча має найнижчий рівень показників екологічної ефективності за індексом ЕРІ і найнижчий рівень енергетичної ефективності серед країн Європи.

Враховуючи завдання Плану відновлення у воєнний і післявоєнний періоди (зокрема прискоренню переходу на відповідальні моделі виробництва і споживання в промисловості), потрібно мати релевантну систему оцінки виконання ЦСР 12.

## **2.4 Проблеми методології оцінки виконання ЦСР 12**

Слід зазначити, що методологія оцінки стану та динаміки впровадження екологічно відповідальних моделей споживання і виробництва (системи індикаторів та методики їх розрахунку) досі є предметом широкого обговорення [22-25]. Зрозуміло, що для оцінювання прогресу по ЦСР 12 потрібна система показників, яка відповідає загальноприйнятим критеріям: релевантність задачам цілі, повнота системи показників для комплексного оцінювання результатів, сумісність методик розрахунків, достатність і доступність баз статистичних даних для аналізу [5; 26].

Без сумніву, відправною точкою для аналізу та оцінки слід розглядати метрики прогресу в досягненні ЦСР 12, встановлені ООН. Відповідно до Порядку денного у сфері сталого розвитку на період до 2030 року, ці метрики повинні охоплювати весь спектр наскрізних завдань (областей дій) по ЦСР 12, а саме: відповідність 10YFP (задача 12.1), скорочення матеріального сліду (задача 12.2), мінімізація втрати харчових продуктів та відходів (задача 12.3), зниження ризиків від обігу хімічних речовин (задача 12.4), скорочення та запобігання утворенню відходів протягом усього виробничого циклу (задача 12.5), впровадження практик сталого управління та звітності про сталій розвиток (задача 12.6), внесок у розвиток сталого споживання (задача 12.7), забезпечення релевантного інформування та залучення всіх зацікавлених осіб у ці процеси (задача 12.8), підтримка науково-технічного потенціалу країн, що розвиваються для сталого споживання та виробництва (задача 12.a), впровадження інструментів моніторингу щодо впливу сталого розвитку на сталість туризму (задача 12.b), раціоналізувати неефективні субсидії на викопне паливо (задача 12.c).

Для відстеження прогресу в досягненні зазначених цільових завдань ЦСР 12 UN Statistics Division (UNSD) пропонує систему глобальних показників, при цьому їх методологія увесь час уточнюється Міжвідомчою експертною групою з індикаторів ЦСР – IAEG-SDGs. Станом на 17 травня 2024 року, оновлені метадані для ЦСР12 містять 13 показників: 5 показників рівня I та 8 показників рівня II<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup>Все індикатори по ЦСР поділяються на три рівні: рівень I – індикатор є концептуально зрозумілим, в ньому є міжнародно-визнана методологія / стандарти розрахунку, а дані регулярно готуються країнами; рівень II – індикатор є концептуально ясним, має міжнародно-визнану методологію / стандарти розрахунку, але країни не надають регулярні дані; і рівень III – жодна міжнародно узгоджена методологія або стандарти поки не доступні для індикатора, але в даний час розробляються (чи будуть розроблятися) або тестуються. Глобальна структура показників для ЦСР була погоджена на 48-й сесії Статистичної комісії ООН, що відбулася в березні 2017 року і прийнята Генеральною Асамблеєю 6 липня 2017 року. Згідно з Резолюцією, структура індикаторів буде щорічно уточнюватися та включатися в систему оцінювання у міру їх виникнення. Комплексний перегляд індикаторів був схвалений 51-ю Статистичною комісією в березні 2020 року. Актуальний опис індикаторів по ЦСР 12 і репозитарій метаданих можна знайти на веб-сайті Статистичного відділу ООН.



**Глава 2 Відповідальне споживання і виробництво в промисловості:  
проблеми вимірювання прогресу в досягненні Цілі сталого розвитку 12**

З іншого боку, не всі глобальні задачі Цілі 12 і відповідні показники включаються до національних стратегій сталого розвитку країн. Так, Україні бракує низки цільових задач, які б сприяли впровадженню моделей сталого виробництва та споживання, наприклад – 12.6-12.7, 12.а, 12.с. (див. табл. 2.2).

**Таблиця 2.2** – Відповідність задач ЦСР12, що стосуються промисловості, за Національною програмою сталого розвитку України глобальним задачам за Порядком денним у сфері сталого розвитку на період до 2030 року (Джерело: [27])

Глобальні задачі ЦСР 12	Українські задачі ЦСР 12
12.2 Домагатися раціонального освоєння й ефективного використання природних ресурсів	12.1 Знизити ресурсоемність економіки
12.4 Домагатися раціонального використання хімічних речовин і всіх відходів упродовж усього їх життєвого циклу відповідно до погоджених міжнародних принципів...	12.3 Забезпечити стале використання хімічних речовин на основі інноваційних технологій та виробництв
12.5 Суттєво зменшити обсяг відходів через вживання заходів щодо запобігання їх утворенню, їх скорочення, переробки та повторного використання	12.4 Зменшити кількість утворення відходів і збільшити обсяг їх переробки та повторного використання на основі інноваційних технологій та виробництв
12.6 Рекомендувати компаніям, особливо великим і транснаціональним, застосовувати сталі методи виробництва та відображати інформацію про раціональне використання ресурсів у своїх звітах	
12.7 Сприяти забезпеченню сталої практики державних закупівель відповідно до національних стратегій і пріоритетів	
12.а Підтримувати країни, що розвиваються, у нарощуванні їх науково-технічного потенціалу для переходу до більш раціональних моделей споживання і виробництва	
12.с Раціоналізувати неефективне субсидування використання викопного палива, що веде до його марнотратного споживання, за допомогою усунення ринкових диспропорцій з урахуванням національних умов, у тому числі через реорганізацію оподаткування та поступову відмову від шкідливих субсидій там, де вони існують, для обліку їх екологічних наслідків ...	

Водночас не всі індикатори ЦСР 12, що входять до глобальної системи UNSD, повною мірою використовуються і в звітах ключових міжнародних організацій (ООН, ОЕСР, ЄС тощо). Наприклад, Глобальний звіт по ЦСР 2020 застосовує лише шість з них, а саме – виробничі викиди SO<sub>2</sub> та за імпортом (кг/душу населення), виробничі викиди азоту та за імпортом (кг/душу населення), електронні відходи (кг/душу населення) і тверді побутові відходи (кг/на душу населення/день).

Другою проблемою є те, що у більшості глобальних звітів з ЦСР не міститься аналізу екологічних показників, що особливо важливі для пострадянських країн, зокрема зі стану викидів по типам парникових газів і стану циркулярності [5; 28]. Так, було б доцільно включати у моніторингові звіти по ЦСР 12 аналізи по показникам, за якими є загальновизнана методика розрахунків і достатність регулярних баз даних для аналізу – таким є, наприклад, Індекс екологічної ефективності (ЕПІ).

База даних Світового банку пропонує регулярну статистику по 55 показникам ЕПІ, що охоплюють теми зміни клімату, здоров'я навколишнього середовища та життєздатності екосистем<sup>13</sup>. Статистика збирається зі звітів по 180 країнам світу, зокрема країнам ЄС і пострадянського простору, починаючи з 1995 року. Більше 40 показників безпосередньо стосуються промисловості, зокрема – очищення стічних вод, управління відходами, якість повітря, скоригований темп зростання викидів чорного вуглецю, викиди по видам парникових газів, т. д. Використання ЕПІ чи його складових показників дозволяє більш об'єктивно проаналізувати політики екологізації виробництва та споживання у порівнянні з різними країнами.

Великою проблемою, вважаємо, є розбіжності в наборі показників та методиках їх розрахунків, які використовуються для оцінки динаміки ЦСР 12 Україною та Євростатом (див. табл. 2.3). Це потенційно може стати певним бар'єром на шляху до посилення інтеграції України в європейські ринки та виробничі мережі [32-33].

Перш за все треба звернути увагу на два глобальних індикатора, що пропонує UNSD: 1) Індикатор 12.2.1: Матеріальний слід, матеріальний слід на душу населення та матеріальний слід на ВВП; 2) Індикатор 12.2.2: Внутрішнє споживання матеріалів, внутрішнє споживання матеріалів на душу населення та внутрішнє споживання матеріалів на одиницю ВВП. Євростат для моніторингу матеріального сліду використовує індикатор «Витрати сировини» (sdg\_12\_21), який включений до пріоритетів в рамках Європейської зеленої угоди. Оцінки рахунків матеріальних потоків на основі моделі в еквівалентах сировини (RME) створюються відповідно до стандартів якості Європейської статистики. Оцінки на рівні країни отримуються за допомогою моделі RME для конкретної країни. Сукупна економіка ЄС оцінюється за допомогою гібридної моделі витрат і випуску на рівні ЄС.

---

<sup>13</sup>Індекс екологічної ефективності (англ. Environmental Performance Index, EPI) – <https://prosperitydata360.worldbank.org/en/dataset/YALE+EPI>.

**Глава 2 Відповідальне споживання і виробництво в промисловості:  
проблеми вимірювання прогресу в досягненні Цілі сталого розвитку 12**

**Таблиця 2.3** – Порівняння індикаторів виконання ЦСР 12 в ЄС і Україні  
(Джерело: побудовано за показниками Євростату і Укрстату)

Показники ЦСР 12 за Євростатом	Показники ЦСР 12 за Укрстатом
sdg_12_21 <i>Витрати сировини</i> , тис. т / т на душу населення Оцінки рахунків матеріальних потоків на основі моделі в еквівалентах сировини (RME) створюються відповідно до стандартів якості Європейської статистики. Сукупна економіка ЄС оцінюється за допомогою гібридної моделі витрат і випуску на рівні ЄС. Оцінки на рівні країни отримуються за допомогою моделі RME для конкретної країни.	12.1.1. <i>Ресурсоемність ВВП</i> , % Розраховується як співвідношення спожитих фізичних обсягів природних ресурсів, утворених відходів та викидів забруднюючих речовин до обсягу ВВП, % до рівня 2015 року
sdg_12_41 <i>Коефіцієнт використання циркулярних матеріалів</i> , % загального використання матеріалів	-
-	12.2.1. <i>Частка післязбиральних втрат у загальному виробництві зернових культур</i> , %
-	12.2.2. <i>Частка післязбиральних втрат у загальному виробництві овочів та багаторічних культур</i> , %
sdg_12_10 <i>Споживання хімічних речовин за небезпекою</i> , млн т – інформація агрегована по ЄС і. небезпечні та безпечні – всього ii. небезпечний загалом iii. небезпечні для здоров'я iv. небезпечні для навколишнього середовища	12.3.1. <i>Частка підприємств, у яких запроваджено системи управління хімічними речовинами згідно з міжнародними стандартами, у загальній сукупності підприємств, що використовують небезпечні хімічні речовини</i> , %
sdg_12_51 <i>Утворення відходів за ступенем небезпеки</i> , кг на душу населення iv. небезпечні та безпечні – всього ii. небезпечні iii. безпечні	12.4.1. <i>Обсяг утворених відходів усіх видів економічної діяльності на одиницю ВВП</i> , кг на 1 тис. дол. США за ПКС 2011 року
-	12.4.2. <i>Частка спалених та утилізованих відходів у загальному обсязі утворених відходів</i> , %
sdg_12_30 <i>Середні викиди CO<sub>2</sub> на км від нових легкових автомобілів</i> , г CO <sub>2</sub> на км Показник визначається як середній рівень викидів вуглекислого газу (CO <sub>2</sub> ) на кілометр нових легкових автомобілів за певний рік	-
sdg_12_61 <i>Валова додана вартість у секторі екологічних товарів і послуг</i> і. обсяги, пов'язані з ланцюгом (2010), євро ii. % ВВП	-
sdg_07_30 <i>Енергоефективність</i> Ланцюгові обсяги (2010) в євро за кг нафтового еквіваленту та PPS за кг нафтового еквівалента	-

В Україні такий показник відсутній, хоча статистика вихідних даних для розрахунку є. Державна служба статистики України щорічно публікує статистичні збірники «Таблиця "витрати-випуск" України», які в основних цінах надають розгорнуту характеристику процесів відтворення та матеріальних потоків між видами економічної діяльності, охоплюючи стадії виробництва та проміжного споживання.

Також зазначимо проблему з моніторингом використання хімічних речовин. За промисловою стратегією ЄС система реєстрації, оцінки, авторизації та обмеження хімічних речовин (REACH) спрямована на покращення захисту здоров'я людини та навколишнього середовища шляхом кращої ідентифікації та управління небезпечними хімічними речовинами. Для глобальної задачі 12.4 «Досягти екологічно безпечного поводження з хімічними речовинами та всіма відходами протягом усього їх життєвого циклу...».

Євростат пропонує розгорнутий індикатор: «Споживання хімічних речовин за ступенем безпеки» (sdg\_12\_10), який включає чотири субпоказника: 1) всього небезпечних та безпечних хімічних речовин; 2) всього небезпечних хімічних речовин; 3) всього небезпечних хімічних речовин для здоров'я; 4) всього небезпечних хімічних речовин для навколишнього середовища. Споживання хімічних речовин розраховується як сума обсягів виробництва та чистих обсягів імпорту хімічних речовин відповідно до рівняння безпеки: споживання = виробництво + імпорт – експорт. Структуру показника планується оновити за Стратегією сталого розвитку хімікатів, яка спрямована на покращення захисту навколишнього середовища та здоров'я людей від ризиків, створених хімікатами, а також на підтримку інновацій для безпечних і сталих хімікатів. В Україні така статистика поки не ведеться.

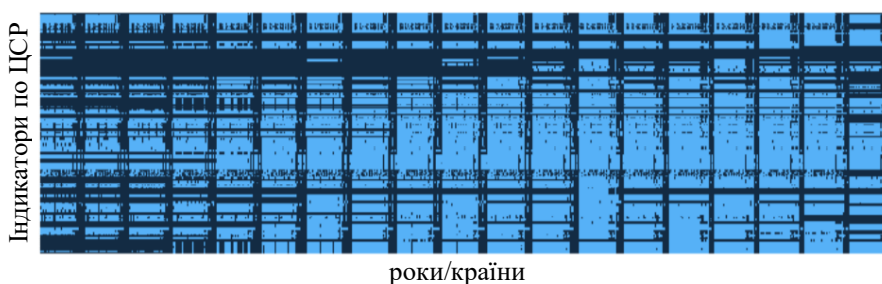
Великим викликом для України є глобальна задача 12.5, що спрямована на зменшення утворення відходів шляхом запобігання, скорочення, переробки та повторного використання. UNSD пропонує глобальний індикатор 12.5.1: Національний рівень переробки та переробленого матеріалу, що прямо вказує на вимірювання рівня впровадження циркулярних моделей виробництва і споживання.

Збільшення циркулярності європейської економіки є ключовим пріоритетом нової промислової стратегії ЄС, прийнятої в 2020 році, і одним із ключових елементів Європейської зеленої угоди. У березні 2020 року Європейська комісія прийняла план дій із економіки замкнутого циклу (CEAP), який має на меті зменшити тиск на природні ресурси та створить стале (зелене) зростання та робочі місця. Восьма Програма дій з навколишнього середовища (EAP), що була прийнята в березні 2022 року, спрямована на прискорення переходу до кліматично нейтральної, ресурсоефективної та відновлюваної економіки, та встановлює ціль подвоїти коефіцієнт циклічного використання матеріалів до 2030 року порівняно з 2020 роком. Новий план дій анонсує ініціативи протягом усього життєвого циклу продуктів [34].

Нову політику підтримує показник «Коефіцієнт використання циркулярних матеріалів» (sdg\_12\_41), що вимірює частку матеріалів, отриманих і повернутих назад в економіку, таким чином заощаджуючи видобуток первинної сировини у загальному використанні матеріалів. Євростат визначає циркуляційне використання матеріалів (CMU), або коефіцієнт циклічності, як відношення циклічного використання матеріалів до загального використання матеріалів. Аналіз показника наводиться у щорічному моніторинговому звіті Євростату щодо сталого розвитку в ЄС (прогрес у досягненні ЦСР у контексті ЄС).

Україна не має подібних показників, але вимірювання стану цього напряму дій є важливим, враховуючи реформи, що передбачені Планом Ukraine Facility, 2024-2027<sup>14</sup>. Розділ 15 «Зелений перехід та охорона довкілля», зокрема, зазначає завдання: здійснювати відновлення відповідно до стандартів ЄС – в рамках зеленого, низьковуглецевого і циркулярного підходу, тобто передбачаючи позитивний вплив на природу та нульове забруднення; привести у відповідність до законодавства ЄС існуючу систему управління відходами. Після 15 років спроб провести реформу контролю за промисловим забрудненням ВРУ все ж прийняла Закон «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення» №11355 від 19.06.2024, який впроваджує положення Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди.

Суттєвою невирішеною проблемою ЄС є прогалини у статистичних даних для аналізу. Так, Luca Farnia [26] в своєму дослідженні статистики Цілей сталого розвитку в Європі показує, що Євростат за деякими індикаторами ЦСР 12 не має приблизно 75% необхідних даних. Зокрема, відсутні дані за окремими періодами часу та за країнами, наприклад, по показнику «Споживання хімічних речовин за рівнями небезпеки» (sdg\_12\_10) є дані лише на агрегованому рівні Європи (див. рис. 2.5).



**Рисунок 2.5** – Прогалини в базі даних Євростату по ЦСР (відсутні значення показників зображені у темно-синьому кольорі; 2000-2018 роки/країни зліва направо; ЦСР від 1 до 17 знизу вгору) (Джерело: [26])

<sup>14</sup>План Ukraine Facility, що був затверджений КМ України 18.03.2024, включає близько ста реформ у 15 галузях, які потрібно виконати протягом 2024-2027 років. Реалізація Плану сприятиме європейській інтеграції України та подальшому формуванню зеленої промисловості. У травні 2024 року Рада Європи дала позитивну оцінку плану дій і затвердила фінансову допомогу на його виконання у розмірі €50 млрд; фінансування вже почалося в 2024 році.

Таким чином, ми приходимо до наступних висновків стосовно практичних труднощів і проблем щодо оцінки виконання ЦСР 12 в Україні.

1) Вимірювання реального прогресу з впровадження моделей сталого виробництва і споживання в Україні вимагає розширення цільових показників за усім комплексом глобальних завдань по ЦСР 12, спираючись на глобальні індикатори, що встановлені спеціальною комісією ООН (UN Statistics Division, UNSD). Зокрема це стосується питань включення інформації про сталий розвиток у статистичні звіти компаній, особливо великих та транснаціональних.

2) Планування та впровадження зеленого розвитку вимагають не тільки розробки національних завдань та цільових показників за ними, але й існування орієнтирів, що можуть показати дистанцію до найкращих досягнень. Для України розбіжності в методиках розрахунків показників потенційно створюють труднощі на шляху до посилення інтеграції в європейський політичний і економічний простір. Важливо уточнити та наблизити свої національні показники за ЦСР 12 до існуючої системи показників Євростату, яка закладає фокуси основної уваги та є єдиною для моніторингу по усім країнам ЄС. Зокрема це стосується показників з оцінки використання циркулярних матеріалів, споживання хімічних речовин за небезпекою, утворення відходів за ступенем небезпеки, оцінки збільшення частки екологічних товарів і послуг, оцінки енергоефективності у ланцюгах створення вартості тощо.

3) Важке завдання переходу на сталі моделі споживання і виробництва потребує величезних зусиль в організації досліджень, щоб мати розуміння динаміки по окремим екологічним показникам, на які особливо впливають галузі промисловості. Тому, на наш погляд, у моніторингових звітах по ЦСР 12 доцільно використовувати існуючі бази статистичних даних, наприклад, результатів глобального моніторингу по Індексу екологічної ефективності (можливо Світового банку), що мають достатню повноту і регулярність формування по країнам світу, зокрема країнам ЄС і України.

4) Суттєвою проблемою є прогалини статистичних даних за прийнятими показниками Євростату, у тому числі відсутність даних по окремим періодам часу та країнам. Для України потрібні орієнтири, якими насамперед слід вважати досягнення країн ЄС по цілям, задачам та конкретним показникам.

## **2.5 Висновки і рекомендації**

Дослідження дозволяє зробити наступні загальні висновки.

По-перше, кожен історичний результат еволюції екологічних вимог до економічної діяльності та визначення інструментів їх реалізації сьогодні має високу актуальність для формування сучасної концепції управління розвитком промисловості.



Зокрема, принципи екологізації економічної діяльності, що були сформульовані Стокгольмською і Ріо-де-Жанейрською деклараціями, стали основою сучасної стратегії зеленої промислової політики Євросоюзу та в Україні. За результатами масштабних конференцій та численних світових самітів отримано чіткі політичні установки, що стосуються методів екологізації економічної діяльності, зокрема встановлення обмежень у споживанні природних ресурсів, врахування екологічних інтересів зацікавлених сторін, т.д. Низка підписаних стратегічних міжнародних угод і конвенцій з питань сталого розвитку, екології та клімату заклали програмно цільовий підхід до нарощування потенціалу зеленого розвитку уздовж виробничих ланцюгів створення вартості. Порядок денний на період до 2030 року визнав трансверсальну Ціль 12 «Відповідальне споживання та виробництво», що передбачає масштабний перехід до низьковуглецевих та циркулярних моделей виробництва.

По-друге, показано, що нові країни зі слабкою економікою, до яких відноситься й Україна, мають певні історичні наслідки свого розвитку і здебільшого ресурсо-експортну орієнтацію, тому є більш вразливими з точки зору завдань ЦСР 12. Проте багато актуальних проблем нових країн, які стосуються практичної реалізації їхнього переходу до відповідальних моделей виробництва і споживання, поки не знаходять адекватного віддзеркалення та конструктивного аналізу в глобальних звітах ключових міжнародних організацій (ООН, ОЕСР, ЄС тощо). Недосконала система вимірювання досягнень країн за ЦСР 12 нівелює критерії та стимули для внутрішніх реформ у слабких економіках, приховує їхні хронічні екологічні проблеми. Враховуючи важливість загальносвітового прогресу в зеленому переході, очевидно, що міжнародні оцінки повинні мати більший операційний вплив. З іншого боку, не всі глобальні задачі ЦСР 12 і відповідні показники включаються до національних стратегій сталого розвитку країн. Так, Україні бракує низки національних цільових задач, які б сприяли впровадженню моделей сталого виробництва та споживання.

По-третє, Україні вкрай не вистачає досвіду, ресурсів та політичної волі, що важливі для системної екологізації повоєнного відновлення промисловості. Але прийнятий план за фінансової, організаційної та іншої підтримки з боку Євросоюзу (Ukraine Facility, 2024-2027) відкриває можливість зробити стрибок до зеленої, низьковуглецевої і циркулярної промисловості, базуючись на досвіді країн ЄС.

Підготовка до реалізації повоєнного відновлення промисловості вимагає докладного опрацювання маркерів озеленення, які будуть використовуватися для моніторингу впровадження відповідальних моделей споживання і виробництва. Але є проблемою розбіжності українських методик розрахунків показників озеленення промислової сфери з методиками ЄС. Національні показники повинні максимально наближатися до існуючої системи показників Євростату, яка закладає фокуси основної уваги та є єдиною для здійснення моніторингу по усім країнам ЄС.

## **Список використаних джерел**

- 1 Zhang, L., et al. (2023). Globalization, green economy and environmental challenges: State of the art review for practical implications. *Financial and Trade Globalization, Greener Technologies and Energy Transition*, 16648714, 133.
- 2 Mensah, J. (2019). Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Social Sciences Journal*, Vol. 5, Issue1. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311886.2019.1653531>.
- 3 Franco, I., Newey, L. (2020). SDG 12 Responsible Consumption and Production. *Actioning the Global Goals for Local Impact*. Springer, 187-217.
- 4 Palekhova, L., Palekhov, D. (2016). Conceptual framework for balancing economic growth and environmental sustainability at regional level. *Scientific Bulletin of National Mining University*, №1, 144-148.
- 5 Palekhov, D., Palekhova, L. (2021). Environmental sustainability in achieving the sustainable production and consumption: challenges of a Post-Soviet transition economy. *Transposition of the Acquis Communautaire – Migration and Environment*. Umweltrecht in Forschung und Praxis 66. Verlag Dr. Kovač, Hamburg.
- 6 Gorova, A., Pavlychenko, A., Borysovs'ka, O., Krups'ka, L. (2013). The development of methodology for assessment of environmental risk degree in mining regions. *Mining of Mineral Deposits*, 207-209.
- 7 Palekhov, D., Palekhova, L. (2019). Responsible Mining: Challenges, Perspectives and Approaches. *Sustainable Global Value Chains*. Eds. Schmidt M., Giovannucci D., Palekhov D. and Hansmann B. Published by Springer, 521-544.
- 8 Conejo, A. N., Birat, J. P., Dutta, A. (2020). A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. *Journal of environmental management*, 259, 109782.
- 9 Ighalo, J. O., Adeniyi, A. G. (2020). A perspective on environmental sustainability in the cement industry. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 2(3), 161-164.
- 10 Lopez, G., Keiner, D., Fasihi, M., Koiranen, T., Breyer, C. (2023). From fossil to green chemicals: sustainable pathways and new carbon feedstocks for the global chemical industry. *Energy & Environmental Science*, 16(7), 2879-2909.
- 11 Kushnirenko, O., Gakhovich, N., Venger, L. (2023). Strategic scenarios for sustainable industrial development of Ukraine in the post-war period. *Baltic Journal of Economic Studies*, 9(1), 89-99.
- 12 Bondarenko, V., Pokynchereda, V., Pidvalna, O., Kolesnyk, T., Sokoliuk, S. (2023). Green economy as a prerequisite for sustainable development: Analysis of international and Ukrainian experience. *European Journal of Sustainable Development*, 12(1), 221-221.
- 13 Handl, G. (2012). Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment (Stockholm Declaration), 1972 and the Rio Declaration on Environment and Development, 1992.
- 14 Egute, T.O., Albrecht, E., Egute, K.A. (2019). From Stockholm to Paris: Four decades of sustainability in international law. *Sustainable Global Value Chains. Natural Resource Management in Transition* Eds.: Giovannucci D., Hansmann B., Palekhov D., Schmidt M., Vol 2. Springer, 65-84.
- 15 Wei, K. H., et al. (2023). A review of glass recycling policies in Stockholm, Hong Kong SAR and Shanghai from a circular economy perspective. *Journal of Cleaner Production*, 140068.
- 16 IUCN, 1980: World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development. Prepared by the International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, ed.

17 Доповідь Комісії Брундтланд: Доповідь Всесвітньої комісії з питань навколишнього середовища та розвитку: Наше спільне майбутнє. Офіційні звіти Генеральної Асамблеї ООН, сорок друга сесія (A/42/427), 4 серпня 1987.

18 Палехова, Л. Л. (2020). Управління сталим розвитком: довідник базових понять. Дніпро: НТУ «Дніпровська Політехніка», (332).

19 Grubb, M., et al. (2019). The Earth Summit agreements: a guide and assessment; an analysis of the Rio '92. *UN Conference on Environment and Development*. Routledge, Chapman & Hall, Incorporated.

20 Hens, L., Nath, B. (2003). The Johannesburg Conference. *Environment, Development and Sustainability*. Springer, Vol 5, 7–39.

21 Gasper, D., et al. (2019). The framing of sustainable consumption and production in SDG 12. *Global Policy*, № 10(2), 83-95.

22 Xu Zh., et al. (2020) Assessing progress towards sustainable development over space and time. *Nature Publishing Group Journal*, Vol. 577, 74–78.

23 Hamad, S., et al. (2023). Assessing the implementation of sustainable development goals: does integrated reporting matter? *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 14(1), 49-74.

24 Dogaru, L. (2021). Green economy and green growth – Opportunities for sustainable development. *Proceedings*, Vol. 63(1), 70.

25 Campagnolo, L., Eboli, F., Farnia, L., Carraro, C. (2018). Supporting the UN's SDG transition: methodology for sustainability assessment and current world-wide ranking. *Journal: Economics*, №2018-10, 1-19.

26 Farnia, L. (2020). Statistics on Sustainable Development Goals in Europe. What should be done and what can be actually done. *Fondazione Eni Enrico Mattei*. URL: [https://unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/ece/ces/ge.32/2020/mtg1/W\\_2\\_3b\\_Farnia\\_Statistics\\_on\\_Sustainable\\_Development\\_Goals\\_in\\_Europe.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/ece/ces/ge.32/2020/mtg1/W_2_3b_Farnia_Statistics_on_Sustainable_Development_Goals_in_Europe.pdf).

27 Pavlychenko, A., Paliekhova, L. (2024). Achieving environmental sustainability in industrial value chains. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: A. Pavlychenko, L. Paliekhova. Dresden, 15-21.

28 Holikova, K., et al. (2020). Sustainable Development Indicators under analysis of European Union Member States and Ukraine. *Proceedings of the III International Scientific Congress Society of Ambient Intelligence 2020*. (ISC-SAI 2020).

29 Лутковська, С. М. (2020). Формування критеріїв та індикаторів оцінки рівня екологічної безпеки регіонів. *Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки та практики*, №51(1), 40-52.

30 Палехова, Л. Л. (2015). Добровільна екологічна сертифікація як інструмент маркетингу. *Управління сталим розвитком в умовах перехідної економіки: монографія*. Дніпропетровськ-Коттбус: НГУ-БТУ, 348-363.

31 Palekhov, D., Paliekhova, L. (2022). Responsible consumption and production in industrial value chains. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: Shvets V., Paliekhova L. Dnipro-Cottbus: Accent, 16-30.

32 Pavlychenko, A., Paliekhova, L. (2024). Achieving environmental sustainability in industrial value chains. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: A. Pavlychenko, L. Paliekhova. Dresden, 15-21.

33 Paliekhova, L. (2024). Vulnerability of some global value chains in crises. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: A. Pavlychenko, L. Paliekhova. Dresden, 40-44.

34 ULRICH (2024). Der Beitrag der Energiewende zur Erklärung des russischen Ukrainekriegs. *Politikum*, 10(1), 66-71.

**RESPONSIBLE CONSUMPTION AND PRODUCTION IN INDUSTRY:  
PROBLEMS OF MEASURING THE PROGRESS TOWARDS  
SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOAL 12**

**Ludmila Paliekhova\***

**Keywords:** sustainable development, environmental sustainability in industry, SDG 12, responsible consumption and production, measuring environmental sustainability.

**The main objective** of this study was to improve the methodological approach to quantifying progress towards achieving the SDG 12 in Ukraine to track efforts towards environmentally sustainable industrial recovery after the war.

**Methodology.** Official documents, reports and research papers related to issues of sustainability management in industry provided a theoretical and methodological basis for this study. In particular, the authors made references to the previous results of their own research in this field. Analysis in the chapter was supported by relevant examples.

**Findings.** Discussions in this chapter took two main directions: 1) investigation of historical stages in the formation of concepts and main trends that are particularly relevant to environmentally sustainable development of the industrial sector; 2) analysis of the main methodological problems in measuring the achievement of SDG 12 in Ukraine, taking into account the objectives of the Plan Ukraine Facility, 2024-2027 for post-war industrial recovery on the principles of the European Green Deal.

Quantifying progress towards achieving the SDG 12 is essential to tracking Ukraine's post-war efforts towards the implementation of the European Green Deal in industrial policy. However, systematic indicators for comprehensive assessing spatio-temporal progress towards achieving the SDGs 12 and its compliance with the European Green Policy are lacking. Here we find out the problems of inconsistency of indicators to quantify progress towards the SDG 12 in industry at national and subnational levels in Ukraine. Our analyzes indicate that there were large methodological variations across European and Ukrainian indicators, which in the future will be a barrier to the integration of Ukrainian companies into the European market.

**Conclusions and Recommendations.** This study confirms the need for detailed adaptation of greening markers that will be used to monitor the implementation of responsible consumption and production models in the post-war recovery of Ukraine's industry. National indicators should be as close as possible to the Eurostat indicator system, which sets the focus and is the unified one for monitoring across all EU countries.

---

\***Ludmila Paliekhova** – Ph.D., Associate Professor, Professor of the Department of Marketing, Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: Paliekhova.L.L@nmu.one; <https://orcid.org/0000-0003-0217-5755>.

## ГЛАВА 3

# ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА СТАЛИЙ РОЗВИТОК У ПРОМИСЛОВИХ ЛАНЦЮГАХ СТВОРЕННЯ ВАРТОСТІ

Тетяна Куваєва\*

**Анотація.** У главі дискутуються фактори впливу на можливості сталого розвитку у промислових ланцюгах створення вартості. Доводиться необхідність впровадження циркулярних моделей виробництва та системи екологічного менеджменту за стандартом ISO 14001; для визначення проблем розвитку у ланцюгу пропонується використання методу LCA. Визначається роль підприємств переробної промисловості у посиленні аспектів сталого розвитку вгору і вниз за ланцюгом створення вартості. Зокрема, в дослідженні демонструються впливи підприємств важкого машинобудування на формування техніко-технологічного фактору у нарощуванні потенціалу сталого розвитку в гірничодобувній промисловості, металургії, електроенергетики та інших галузях народного господарства.

**Ключові слова:** сталий розвиток, промислові ланцюги створення вартості, техніко-технологічні фактори сталого розвитку, важке машинобудування, Україна.

### 3.1 Вступ

**Постановка проблеми.** Через деградацію навколишнього середовища та зміну клімату до промислової сфери висувається новий рівень принципів вимог щодо збільшення відповідальності перед суспільством, у тому числі майбутніх поколінь. Насамперед це стосується питання змін в галузі надрокористування і використання органічних матеріалів, поводження з промисловими відходами і перероблення відпрацьованих матеріалів, правил використання небезпечних хімічних речовин, запобігання, зменшення та пом'якшення можливих негативних впливів на навколишнє середовище, зменшення викидів вуглецю та витрат енергії, поліпшення умов праці та впровадження інструментів сталого розвитку [1-2].

Зрозуміло, що зазначені вимоги впливають на завдання стратегічного та операційного менеджменту, зокрема посилюється увага до застосування міжнародних екологічних стандартів та формування іміджу виробничого підприємства, пошуку спільних інтересів і вибудовування ланцюгів взаємодії з відповідальними інвесторами, постачальниками і покупцями тощо [3-4].

---

\*Куваєва Тетяна Володимирівна – к.е.н., доцент кафедри маркетингу, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна. E-mail: [kuvieva.t.v@ntnu.one](mailto:kuvieva.t.v@ntnu.one); [orcid.org/0000-0002-8796-3189](https://orcid.org/0000-0002-8796-3189).



Аналіз цього контексту в Україні підтверджує, що вітчизняні підприємства промисловості поки не приділяють достатньо уваги методам збалансування екологічних, соціальних та економічних викликів розвитку [1; 5-6]. Мусимо констатувати, що наявних досліджень недостатньо для вирішення поставлених задач, особливо у галузях господарства, принципово важливих для переходу на відповідальні моделі виробництва і споживання уздовж ланцюгів створення вартості<sup>1</sup>.

*Мета дослідження.* Метою даного дослідження є систематизація існуючих уявлень щодо суті категорії, ролі, завдання та факторів посилення сталості українських підприємств важкого машинобудування, що сприяють поширенню практики сталого розвитку у пов'язаних галузях – електроенергетики, металургії, гірничодобувної промисловості та інших галузях народного господарства. Фокусом особливої уваги є вивчення методів дослідження стану сталого розвитку та його окремих складових в промислових ланцюгах створення вартості.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Узагальнення результатів останніх досліджень показує відсутність узгодженості висновків та практичних рекомендацій для посилення сталості в промислових ланцюгах створення вартості. Деякі вчені, наприклад Г. Дугінець [7], взагалі висловлюють думку, що принципи сталого розвитку практично неможливі для деяких галузей промисловості, зокрема гірничодобувної, металургійної та машинобудівної. У якості аргументів наводиться те, що, наприклад, підприємства гірничодобувної галузі зазвичай використовують застарілі технології видобутку та переробки корисних копалин, тоді як сталий розвиток покладає свою ключову стурбованість, в першу чергу, на екологічні проблеми.

Проте більшість науковців навпаки доводять неминучість сталого переходу у промисловості, що обумовлена такими потужними драйверами, як: 1) зменшення витрат та ризиків на операційному рівні (С. Лунд [8] та ін.); 2) отримання ринкових вигід (Л. Палехова і Д. Палехов [1; 5] та ін.); 3) поліпшення законодавчого регулювання та дій органів державної влади (J. Nauge [3] та ін.).

Сучасні тренди у промисловості все більше пов'язані з такими факторами, як збільшення операційної ефективності без втрати зайвих ресурсів, удосконалення корпоративних цінностей та культури компаній, підвищення репутації брендів і т. д., що сприяють об'єднанню зусиль добровільних асоціацій в ланцюгах створення вартості [1-5]. Для українських підприємств у галузі важкої промисловості є важливим збалансування екологічних, соціальних та економічних потреб, що сьогодні стає загрозою для їх просування на вітчизняних і міжнародних ринках.

---

<sup>1</sup>*Ред.* Наприклад, Google Scholar за показниками цитування пропонує більше 1 680 тисяч публікацій з дослідження питань сталості у промислових ланцюгах створення вартості (англ. Sustainability in Industrial Value Chains), але публікацій українських вчених, що торкаються цієї тематики, менше 10 тисяч.



Вважаємо, що тиск з боку законодавства та уряду не є дуже важливим позитивним чинником, який може ефективно стимулювати компанії до впровадження сталої практики. Тому в нашому дослідженні зосереджена увага на двох перших групах факторів, тобто ризиках та витратах на операційному рівні, а також на маркетингових вигодах. Такому підходу спонукають дослідження Портера [9], оскільки саме ці фактори є основними складовими діяльності з додавання вартості. Ми будемо виходити з того, що методи дослідження сталості передбачають вивчення підходів, як створити цінність, що принесе користь ключовим стейкхолдерам, включаючи навколишнє середовище та суспільство<sup>2</sup>.

### **3.2 Визначення проблеми сталого розвитку у промислових галузях України**

У фундаментальній доповіді Міжнародної групи ресурсів «Ефективність ресурсів: потенціал та економічні наслідки» (англ. Efficiency Potential and Economics Implications)<sup>3</sup>, представленої в Японії у 2016 році, наголошується, що природні ресурси є основою для процвітання будь-якої країни. У той же час усі цілі сталого розвитку (ЦСР), що визначені ООН, вимагають організації сталого управління використанням природних ресурсів, особливо невідновлюваних. В цьому зв'язку треба оцінювати ризики, які обумовлені існуючими впливами лінійних систем промислового виробництва. Єдиним шляхом для досягнення ЦСР є радикальна зміни менталітету менеджменту, систем виробництва та споживання у напрямку використання циркуляційних бізнес-моделей на заміну лінійним.

Дослідження Ellen MacArthur Foundation<sup>4</sup>, Комісії ЄС, ОЕСР підтверджують, що перехід до нової бізнес-логіки вимагатиме рішучих дій у формуванні екологічно збалансованої політики на всіх рівнях управління розвитком.

---

<sup>2</sup>Ред. Уточнимо, що у 2011 році, узагальнюючи накопичені знання, Майкл Портер і Марк Креймер переключили увагу із процесу управління створенням конкретних благ на перехід до нарощування спільних цінностей уздовж пов'язаних виробництв (див.: Палехова, Л., Палехов, Д. (2016). Звітність з питань сталого розвитку. *Управління сталим розвитком в умовах перехідної економіки. Монографія*. Дніпропетровськ-Коттбус: НГУ-БТУ, 67-82).

<sup>3</sup>Ред. Починаючи із заснування у 2007 році, Міжнародна група експертів з питань ресурсів (англ. The International Resource Panel) публікує незалежні, авторитетні та політично релевантні наукові оцінки майбутнього стану, управління та використання природних ресурсів (див.: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7585/G9ResourceReport%20LWRES-3.pdf?sequence=1&isAllowed=y>).

<sup>4</sup>Ред. Фонд Еллен Макартур (англ. Ellen MacArthur Foundation, EMF) – це міжнародна некомерційна організація, що була заснована у 2010 році з метою прискорення переходу до економіки замкнутого циклу. Дії EMF спрямовані на зменшення відходів і забруднення, посилення обігу продуктів і матеріалів за найвищим рівнем доданої вартості, сприяння збереженню та відновленню природи (див.: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>).

Останні публікації Римського клубу (*англ.* Reports to the Club of Rome)<sup>5</sup> також доводять, що перехід до циркулярних моделей зі збільшенням частки відновлювальної енергії та підвищенням матеріальної ефективності сприятиме нарощуванню економічної конкурентоспроможності підприємств та регіонів.

Просування та імплементація циркулярної моделі виробництва можливе за рахунок таких заходів:

- відображення ринковими цінами повної вартості витрат економіки;
- переробка та повторне використання відходів та залишків продукції;
- сприяння використанню відновлювальної енергії;
- підтримка інновацій в низьковуглецевих рішеннях;
- запровадження стандартів сталого розвитку в ключових секторах економіки.

Сьогодні такі процеси мають критичне значення для усіх країн, особливо з перехідною економікою, з яких жодна поки не спроможна забезпечити створення замкнутих матеріальних циклів. У той же час, спільні правила можуть суттєво просувати виконання ЦСР та полегшувати входження у глобальні ланцюги створення вартості. Рейтинг країн за поточним виконанням ЦСР (за зведеним індексом) демонструє, що безперечними лідерами є країни ОЕСР. Україна поступається своїми позиціями за цим показником, що пов'язано із надмірним використанням природних ресурсів та зростанням екологічного сліду промислової сфери.

Для всього світу наразі на порядку денному є розроблення заходів, які б стимулювали компанії імплементувати стандарти, спрямовані на підвищення ресурсної ефективності виробництва уздовж ланцюгів створення вартості. Основні завдання пов'язані як з нарощуванням можливостей для підвищення енергоефективності енергоємних галузей, так і досягненням більш глибокої інтеграції усіх видів діяльності для збільшення створення додаткової вартості [10-11].

У відкритих економіках промислові галузі не можуть конкурувати на міжнародному рівні, якщо їхні внутрішні ціни на енергію ростуть швидше, ніж аналогічні ціни за кордоном. Встановлення високих цін зазвичай може бути запроваджено з метою контролю рівнів забруднення, що сприяє досягненню ЦСР.

Рис. 3.1 демонструє безумовний зв'язок енергетичного сліду країн із політикою цін на енергію. Енергетичний слід виражається у викидах CO<sub>2</sub>, що є одним з основних показників зеленого зростання за методикою ОЕСР<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup>Див.: Berg, C. (2019). Sustainable Action: Overcoming the Barriers (Routledge Studies in Sustainability); Kuenkel, P. (2019). Stewarding Sustainability Transformations: An Emerging Theory and Practice of SDG Implementation

<sup>6</sup>Див.: <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>.



**Рисунок 3.1** – Зіставлення середніх значень енергетичного сліду та цін на енергію (Джерело: складено за даними Eurostat і OECD, 2019)<sup>7</sup>

Можна стверджувати, що високі ціни на енергію у промислово розвинутих країнах сприяють зменшенню енергетичних впливів на навколишнє середовище. Ефект від підвищення цін на енергоносії також може бути пов'язаний з фактичними рівнями цін на енергоносії. Але тільки низькі ціни можуть бути недостатнім стимулом для переходу на менш забруднюючу технологію виробництва. Зрозуміло, що існує багато інших факторів, що сприяють або стримують перехід до сталого розвитку. Загально доведено, що підвищення енергоефективності, перехід на відновлювальні джерела та застосування стандартів сталого розвитку є важливими для сталого переходу промисловості в будь якій країні.

Якщо розглядати питання стандартів, то в Україні рішення про застосування міжнародних, національних і корпоративних стандартів переважно є добровільним<sup>8</sup>. Обов'язки щодо виконання вимог певних стандартів встановлюється різними шляхами. Наприклад, посилання на стандарти можуть бути визначені в контрактах на поставку продукції чи виконання послуги, або якщо виробник чи постачальник продукції складає декларацію про відповідність вимогам певного стандарту тощо.

<sup>7</sup>Див.: <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>;  
<https://www.enerdata.net/about-us/company-news/energy-prices-and-costs-in-europe.pdf>;  
<http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ECO/WKP>.

<sup>8</sup>Ред. Треба підкреслити, що після отримання незалежності Україна довго зберігала технічне регулювання економічної діяльності на основі обов'язкових стандартів і сертифікації. Тільки у 2018 році, виконуючи вимоги Угоди про асоціацію з ЄС, було скасовано Декрет Кабінету Міністрів України від 10.05.1993 № 46-93 «Про стандартизацію і сертифікацію», а система сертифікації УкрСЕПРО припинила своє існування. Після цього згідно зі ст. 24 Закону «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» (редакція від 01.01.2024) оцінка відповідності стандартам не вимагається технічними регламентами і здійснюється на добровільних засадах (див.: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19#Text>).

Зазначимо, що світова спільнота розробила різні системи добровільних екологічних стандартів, кожна з яких виконує своє конкретне завдання. Усі стандарти можна розділити на два типи – загальні (міжгалузеві) та спеціальні (галузеві). На відміну від технічних регуляторів примусового виконання, добровільна сертифікація, включаючи на відповідність екологічним стандартам, заснована на ринкових механізмах і сприяє вільній і чесній конкуренції [12, с. 70]. Проте багато українських промислових підприємств ще не можуть адаптуватися до лібералізації умов бізнесу.

Міжнародні добровільні стандарти вимагають відкритості та прозорості бізнес процесів, сприяють отриманню вигід від глобалізації усіма учасниками виробничо-збутових ланцюгів. Також важливо, що добровільні стандарти гарантують, що різні учасники процесів мають однакову інтерпретацію вимог сталості до організації виробництва і споживання. Українські компанії, що прагнуть розвиватися у глобальних ланцюгах створення вартості, повинні відповідати європейським системам стандартів, що важливі для відповідних ринків і ланцюгів [10; 13].

Окрему групу складають системи екологічних стандартів, що є добровільними. Основними серед них можна вважати Схему екологічного менеджменту та аудиту (англ. Eco-Management and Audit Scheme, EMAS), що діє в Європейському союзі, та систему екологічного менеджменту за стандартом ISO 14001. Найбільше сертифікацію на відповідність ISO 14001 використовують в енергоємних галузях промисловості. На рис. 3.2 показано, що за аналітичними звітами OECD до основних енергоємних секторів відносять металургійну та і хімічну промисловість.



**Рисунок 3.2 – Енергоємність по секторам промисловості**  
(Джерело: складено за даними OECD, 2017)<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup>Див.: [https://www.oecd.org/en/publications/world-energy-statistics-2018\\_world\\_energy\\_stats-2018-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/world-energy-statistics-2018_world_energy_stats-2018-en.html).

Вимоги ISO 14001 є невід'ємною частиною EMAS. Однак європейська схема екологічного менеджменту є більш суворою стосовно правил проведення сертифікації систем екологічного управління, наприклад з питань дотримання екологічного законодавства, добровільної звітності та відкритості, урахування інтересів зацікавлених сторін [12, с. 110].

Впровадження системи екологічного менеджменту за ISO 14001 надає вагомі економічні вигоди, зокрема зменшення витрат на сировину і енергію, покращення іміджу компанії, збільшення обсягів збуту, зменшення відходів, сприяння участі у глобальних ланцюгах створення вартості [12]. Для українських виробників добровільна екологічна сертифікація може стати ефективним маркетинговим інструментом для отримання конкурентної переваги. Але станом на 2018 рік в Україні було зареєстровано лише 348 компаній, що сертифіковані на відповідність ISO 14001.

### **3.3 Передумови дослідження сталості в промислових ланцюгах створення вартості**

Парадигма управління ланцюгами створення вартості на основі ініціатив та добровільних стандартів сталого розвитку передбачає певні зміни ділової поведінки на основні стратегії взаємодії підприємств у виробничо-збутових ланцюгах. Доведено, що традиційні концепції управління (зокрема ресурсний підхід, трансакційна теорія тощо) не в змозі забезпечити збалансованість дій учасників у досягненні сталого розвитку у виробничо-збутових ланцюгах. Необхідні зміни в системах управління провідних учасників, щоб передбачити свої впливи на поведінку інших та формувати вихідні фактори сталості [13-16].

Як відомо, суб'єкти економічної діяльності в промислових ланцюгах створення вартості вступають в специфічну взаємодію протягом відносно тривалого часу. Такий взаємозв'язок є певним комбінованим процесом, включає в себе не тільки фізичне переміщення товарів, а й соціальний, діловий, інформаційний обмін по всьому ланцюгу [14]. Вхідження в стійкі ланцюги зменшує невизначеності у відносинах поставок для власного виробництва, а також сприяє стабілізації попиту на кінцеві продукти. При цьому кожен із суб'єктів промислового ланцюгу має різну можливість впливу на сталість розвитку інших учасників. Підприємства машинобудування в силу специфіки своєї спеціалізації і ролі в технічному розвитку виробництва можуть стати потужним генератором вертикального впливу на сталість розвитку низки галузей, дозволяючи задовольняти вимоги до економії ресурсів, енергоефективності, екологічної сталості та безпеки праці. Прикладом таких можливостей, зокрема, є підприємства гірничого машинобудування, що враховуючи сучасні технологічні тенденції, можуть сприяти формуванню відповідального гірництва в Україні [1].

На жаль, як і в більшості інших країн пострадянського простору, українська гірничодобувна промисловість знаходиться в украй важкому стані і потребує глибоких перетворень. В умовах перехідної економіки конфліктність галузі гірництва стає серйозним бар'єром у формуванні сталості національної промисловості [1].

Підкреслимо, що за останні роки обсяги виробництва видобувної промисловості мають стійкий тренд на збільшення, хоча загальні обсяги промислового виробництва в Україні скорочувалися. Значною мірою таке збільшення пояснюється стресовим станом українського енергетичного ринку – країна змушена шукати способи незалежного енергозабезпечення, в тому числі нарощувати власний видобуток вуглеводнів і посилювати енергетичну ефективність. Збільшення видобутку кам'яного та бурого вугілля, сирої нафти і природного газу повинно сприяти вирішенню завдань енергобезпеки вітчизняного виробництва та нарощування сталості промислових ланцюгів створення вартості<sup>10</sup>.

Слід підкреслити, що кризовий стан енергетичного сектору України формує не тільки виклики, але й унікальні можливості для переходу видобувних галузей на нову модель розвитку, яка має вивести їх з традиційно низькорентабельного, екологічно небезпечного і соціально нестабільного стану. Відповідно до сучасного бачення прогресу видобувної галузі, менеджмент гірничодобувної компанії повинен забезпечувати її відповідальність з огляду на стан всього виробничо-збутового ланцюга. Формування сталих ланцюгів, що мінімізують загальну енергоємність та частку енергетичної складової в собівартості продукції, дозволить забезпечити необхідну конкурентну спроможність на міжнародних ринках.

Міжнародний стандарт «Ініціатива щодо забезпечення відповідальної розробки корисних копалин» – IRMA (*англ.* Initiative for Responsible Mining Assurance), рекомендований для широкого використання гірничодобувними підприємствами в усіх країнах світу, розглядається ключовим механізмом забезпечення відповідальності у видобувних галузях. Стандарт спрямований на формування відповідальних промислових виробництв, що стосуються видобування металів і мінералів, передбачає активну участь основних стейкхолдерів та застосування відповідальних практик усіма учасниками виробничого ланцюга [1].

За стандартом IRMA змінюються вимоги й до підприємств гірничого машинобудування. Відповідно виробники машин та устаткування для видобувного виробництва повинні включитися в технічне забезпечення реформ і сприяти нарощуванню техніко-технологічного прогресу гірничошахтного комплексу.

---

<sup>10</sup>*Ред.* Проте, зазначимо, Україна прагне відмовитися від використання вугілля, щоб до 2050 року стати кліматично нейтральною. Навіть в реаліях жорстокого стану війни, на Конференції з питань відновлення України (Ukraine Recovery Conference – URC2024) було підтверджено, що Україна не планує використовувати вугілля в електроенергетиці після 2035 року (див.: <https://ecoaction.org.ua/ukraina-bez-vuhillia-popry-vijnu.html>).



**Глава 3 Дослідження факторів, що впливають на сталий розвиток у промислових ланцюгах створення вартості**

Процес збільшення енергоефективності гірничодобувного підприємства охоплює всі елементи виробничо-збутового ланцюга створення вартості (див. табл. 3.1). На кожному етапі такого ланцюга необхідно визначити ключові фактори, що впливають на енергоефективність процесу створення вартості, виявляючи залежності та впливи енергоспоживання на загальну виробничу складову [15].

**Таблиця 3.1** – Функціональне перетворення ланцюга створення вартості в добувній промисловості (Джерело: складено автором)

Перетворення	Визначення	Вхід	Вихід
Визначення місцезнаходження	Визначення покладів корисних копалин	Передбачуваний обсяг покладів корисних копалин	Оцінка корисних копалин
Оцінка	Визначення прибутковості проекту	Оцінка корисних копалин	Банківська експертиза
Підстава	Виконання плану підприємства	Банківська експертиза	Доступні корисні копалини
Розробка	Видобуток корисних копалин	Доступні корисні копалини	Сортована зруйнована порода
Транспорт	Рух сортованої зруйнованої породи від джерела до місця призначення	Сортована зруйнована порода	Резерв вантажомісткості на одному рівні
Збагачення	Збагачення корисних копалин, перетворення їх в товарну продукцію, позбавлення від домішок	Резерв вантажомісткості на одному рівні	Товарна продукція
Ринок	Максимізація прибутку	Товарна продукція	Доходи і прибуток
Ліквідація	Скорочення операцій	Доходи і прибуток	Нова економічна ситуація

Отже, можна виділити три етапи для підвищення енергоефективності:

- аналіз економічного та/чи екологічного ефекту від прийнятих змін;
- визначення на кожному етапі ланцюга створення вартості енерговитратних проблем, які можуть бути усунені, їх ранжування;
- виявлення впливів змін на весь ланцюг.

Кожна зміна в будь-якій ланці ланцюгу позначається на енергоефективності в наступних процесах. Тому необхідно враховувати інтегральний ефект від проведення заходів щодо підвищення енергоефективності окремих ланок. Так підвищення якості вихідного продукту однієї з ланок, навіть при збільшенні питомих енерговитрат на його виробництво, може привести до відчутного зниження енерговитрат при подальшій його переробці, тобто інтегральний ефект може бути позитивний, а при незначному – негативний.

Однією з основних труднощів формування сталих ланцюгів створення вартості гірничодобувних підприємств полягає в тому, що такі компанії самі по собі є великими споживачами паливно-енергетичних ресурсів, частину з яких вони отримують від постачальників, а іншу виробляють на власних об'єктах. Через високу енергоємність продукції, зниження частки енергетичної складової в собівартості кінцевої продукції є досить складним питанням.

Очевидно, що вагомими джерелами зниження енергоємності гірничих підприємств є отримання відповідного устаткування і комплектуючих до них. Тобто формування сталих взаємозв'язків відбувається в тому випадку, коли продукція постачальників відповідає цим критеріям. Такі критерії найчастіше мають кількісний характер: відсоток зниження споживання електроенергії, відсоток збільшення коефіцієнта корисності або продуктивності тощо.

Потенційно підприємства гірничого машинобудування мають хороші ринкові перспективи збуту, оскільки сьогодні в українських видобувних компаніях потрібна заміна більше 40% всього парку бурових установок. Разом з тим бурові компанії прагнуть отримати високотехнологічні установки, що відповідають високими виробничими характеристиками, вимагають здійснювати контрольну збірку практично всіх бурових установок на майданчику виробника і проведення їх випробувань в присутності замовника.

### **3.4 Методи дослідження сталості в ланцюгах створення вартості**

У літературі ланцюг створення вартості визначається як злагоджена мережа всіх суб'єктів та видів діяльності, які беруть участь у розробці, виробництві та постачанні необхідних компонентів для створення кінцевих продуктів. Щоб ланцюг був сталим усі учасники повинні вкладати зусилля, щоб мінімізувати загальний вплив на навколишнє середовище та людей по всьому ланцюгу – від видобування сировини та виробництва до зберігання, доставки та кожної транспортної ланки між ними [1-3].

Мета управління сталістю у ланцюгах створення вартості полягає в тому, щоб мінімізувати шкоду для навколишнього середовища від таких факторів, як споживання енергії, споживання води та генерація відходів, одночасно надаючи позитивний вплив на людей та громади в їхньої діяльності та діяльності навколо неї. Управління ланцюгами поставок – це практика координації пошуку, виробництва, управління запасами та транспортування між усіма учасниками ланцюга поставок для максимальної ефективності та задоволеності клієнтів. Багато компаній реалізують значну економію часу та коштів, оцінюючи та покращуючи управління ланцюгами поставок. У той час як традиційне управління поставками зосереджується на швидкості, вартості та надійності операцій, формування сталих ланцюгів поставок додає цілі підтримки екологічних та суспільних цінностей.

Нарощування сталості уздовж ланцюгів поставок означає вирішення глобальних проблем, таких як зміна клімату, безпека води, вирубка лісів, права людини, справедлива трудова практика та корупція [16-17]. Компанії повинні вживати заходи зі скорочення викидів вуглецю, зменшення відходів, запобігання забрудненню та покращення умов праці. Програми сталого розвитку в системах ланцюгів поставок (SCM) передбачають, зокрема, відстеження показників щодо відновлюваної енергії, переробки відходів та збільшення соціальної відповідальності серед постачальників.

Гарний приклад моделі відповідального виробництва демонструє автомобільний завод компанії Subaru в Індіані, що став першим американським підприємством з нульовими відходами і дбає про сталість уздовж своїх ланцюгів поставок, як це задокументовано у *Scientific American*<sup>11</sup>.

Підсумкова декларація саміту G20 у Лос-Кабосі від 2012 року підтвердила, що глобальні ланцюги створення вартості стали домінуючим механізмом у досягненні сталості світового виробництва [12, с. 59]. За своєю природою промислові ланцюги часто включають енергоємні виробництва та транспортування товарів по багатьом країнам та корпораціям, що загострює проблему координації відповідальності сумісної економічної активності. Проблема стосується важливих експлуатаційних міркувань, зокрема таких як екологічні впливи та умови праці на заводах численних постачальників. Є досвід, коли компанії встановлюють правила та використовують розвідувальні дані, щоб продукція постачалася з найближчого дистриб'юторського центру, щоб зменшити впливи на навколишнє середовище і посилити сумісні вигоди.

Управління сталістю в ланцюгах створення вартості потребує дослідження факторів, що діють у ланцюгах створення вартості, та розробки системи координації, регулювання та контролю дій уздовж їхніх провідних учасників. Управління може спиратися як на офіційні правила, що узгоджуються з партнерами, так і на комерційні імперативи конкуренції, які впливають на організацію виробництва [13; 16-17]. Зрозуміло, що ролі суб'єктів у створенні вартості розподіляються не рівномірно, а доступ до ринкових можливостей більш слабких суб'єктів потребує розуміння того, як організовані виробничі системи для задоволення конкурентних вимог. У літературі доведено, що глобальні ланцюги створення вартості не є однорідними, вони розрізняються за ступенем асиметрії влади та координації [18] (див. рис. 3.3).

---

<sup>11</sup>*Ред.* Subaru of Indiana Automotive, Inc. (SIA) – автомобільний завод у Лафайетті, штат Індіана, США. Протягом своєї історії SIA розвивав концепцію сталості за комплексом показників, пов'язаних з безпекою, якістю та навколишнім середовищем. Компанія найбільш відома тим, що 4 травня 2004 року стала першим виробником автомобілів у Сполучених Штатах, який отримав офіційний статус нульового сміттєзвалища (див.: *The Zero-Waste Factory. Scientific American* – <https://www.scientificamerican.com/custom-media/scjohnson-transparent-by-design/zerowastefactory/>). У 2019 році компанія SIA відсвяткувала кілька важливих подій, зокрема 30 років виробництва, 4-мільйонний Subaru та 10 років виробництва без звалищ (див.: <https://www.subaru-sia.com/environment>).

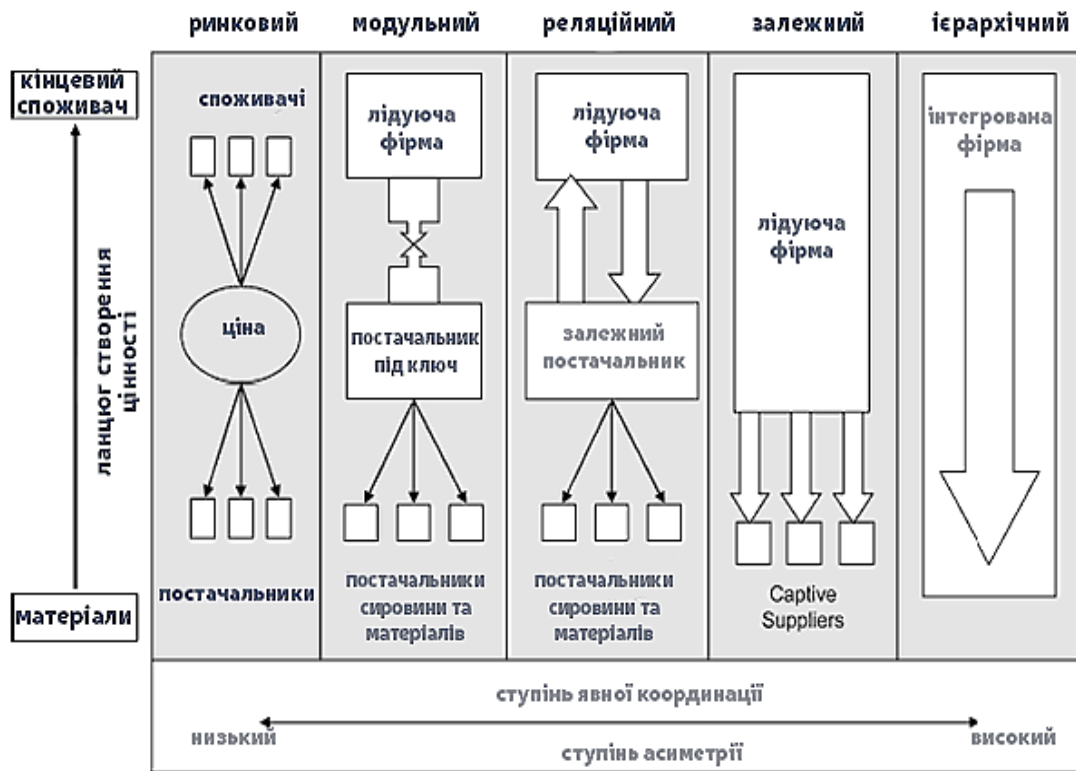


Рисунок 3.3 – Глобальна класифікація ланцюгів створення вартості  
(Джерело: [18])

У цілому розрізняють три види моделей створення вартості: (1) модель вартісної корисності, яка може бути застосована до компаній, чітко визначаючи вимоги споживачів та маркетингове середовище; (2) модель адаптивної вартості, яка може бути застосована до компаній, що чітко визначають вимоги клієнтів; та (3) модель спільного створення цінності, яка може бути застосована до компаній зі складним середовищем та неоднозначними вимогами клієнтів [11-13].

При дослідженні сталості в промислових ланцюгах створення вартості доцільно прийняти модель створення спільної цінності для розробки механізму сталого створення вартості. Бажано зменшити кількість учасників до мінімальної кількості. Передбачається, що всі учасники мають узгоджене розуміння концепції розвитку ланцюга створення вартості, дотримуються встановлених вимог для досягнення сталості і мають відповідні можливості для спільного створення цінності, зокрема діалог, доступ, ризик-вигода та прозорість.

Відповідно процес дослідження сталості в ланцюгах створення вартості складається з чотирьох основних кроків, необхідних для вибору системи розподілу в умовах нестачі ресурсів, а саме:

- (1) визначення критеріїв та формування загального розуміння аспектів пріоритетності ланцюгів доданої вартості;
- (2) зважування встановлених критеріїв;
- (3) визначення потенційних підгалузей, продуктів чи товарів, які доцільно було б розглянути;
- (4) побудова матриці для ранжування продуктів відповідно до критеріїв сталості.

Остаточний пріоритет можна визначити на основі отриманого рейтингу.

### **Крок 1 Визначення критеріїв та пріоритетів**

Аналіз ланцюга створення вартості починається з вибору самого ланцюга. Першим кроком є розгляд пріоритетів у рейтингу потенційного ланцюга створення вартості. Вони можуть включати такі інтегровані критерії за трьома складовими сталого розвитку.

#### *Соціальна складова:*

- наявний рівень і структура зайнятості бідних верств у виробництві та реалізації продукції;
- потенціал продукту/діяльності для зменшення бідності;
- потенціал трудомістких технологій;
- низькі бар'єри для залучення бідних (капітал, знання);
- соціальна допомога;
- показники захворюваності та/або абсолютної бідності.

#### *Економічна складова:*

- потенціал ринку;
- значний внутрішній та/або міжнародний попит на продукт;
- потенціал зростання певних продуктів/видів діяльності;
- можливість збільшення масштабу;
- потенціал залучення державних інвестицій до приватних інвестицій.

#### *Екологічна складова:*

- екологічна сталість в межах національних та регіональних стратегій;
- стан навколишнього середовища;
- охорона природи і навколишнього середовища;
- охорона ґрунтів і утилізація відходів;
- якість водних ресурсів;
- забруднення і споживання водних ресурсів;
- охорона атмосферного повітря (якість, викиди CO<sub>2</sub>, захист клімату);
- використання сировини і матеріалів (в т. ч. відходів);
- відновлювальні джерела енергії.

Це не єдині критерії, які необхідно враховувати при оцінці ланцюга створення вартості. Використовувані критерії будуть змінюватися залежно від місцевих умов та ситуації. Перелік вище слід розглядати як відправну точку для прийняття рішення щодо того, які критерії можна використати. У літературі пропонується, щоб рішення про те, які конкретні критерії використовувати для оцінки ланцюга створення вартості, приймалися за обговоренням усіма основними учасниками. Це сприяє збільшенню володіння процесом, а також може зміцнити спільне розуміння учасниками потенційних напрямів поліпшення сталості ланцюгів створення вартості. Після узгодження вибору критеріїв учасники повинні перейти до зважування критеріїв. Якщо організаційно неможливо здійснити процес розробки критеріїв за участю усіх головних учасників, слід розглянути можливість попереднього вибору меншого набору критеріїв для оцінки ланцюга створення вартості.

### **Крок 2 Зважування критеріїв**

Цілком зрозуміло, що обрані критерії будуть мати різну важливість для оцінки сталості ланцюга створення вартості. Деякі критерії можуть мати більш високий рівень важливості у процесі прийняття рішень для розвитку у галузі, а тому повинні мати більший вплив на ранжування ланцюгів створення вартості. Для досягнення збалансованої системи оцінки потрібне зважування, де різним критеріям призначається числове значення, що використовується під час процесу ранжування. Призначені різні числові значення відображають відносну важливість критеріїв. Зважування зазвичай призначаються двома основними способами:

- Просте числове присвоєння (наприклад, 1, 2, 3 або 4), де відносна важливість критеріїв прямо пропорційна числовому зважуванню. Це означає, що критерій з вагою 4 вважається вдвічі важливішим за критерій з вагою 2 і в 4 рази важливішим за вагу 1.
- Пропорційне присвоєння – вважається, що у сумі використані критерії мають вагу 100 відсотків, а відносна важливість кожного критерію відображається у частці загальної ваги. Це означає, наприклад, якщо є 3 критерії, то їх можна зважити як Критерій 1 (50%); Критерій 2 (30%) та Критерій 3 (20%).

### **Крок 3 Визначення переліку потенційних продуктів/видів діяльності**

Після того, як критерії вибору ланцюга створення вартості для аналізу будуть визначені та зважені, наступним кроком є обґрунтування переліку всіх потенційних ланцюгів доданої вартості / продуктів / товарів, які можна було б виявити у географічній зоні, що розглядається. Цей перелік можна розробити за участю зацікавлених сторін. Зацікавлені сторони можуть бути тими ж, що розробили критерії на кроці 1, або іншими. Визначені ланцюги створення вартості, як правило, базуються на продуктах, які вже виробляються в даному районі, чи на продуктах, які технічно доцільно виробляти в даному районі, чи на продуктах, які вважаються конкурентоспроможними на ринку (це місцевий, регіональний, національний чи міжнародний ринок) тощо.



#### **Крок 4 Ранжування продуктів/видів діяльності**

Після того, як перелік потенційних ланцюгів вартості та критеріїв буде визначено, наступним кроком є ранжування ланцюгів на основі зважених критеріїв, розроблених у кроках 1 та 2. Рейтингування можна проводити різними методами: використання матриці оцінки та парний відбір. Для рейтингу складається матриця оцінок, що містить критерії та ланцюги доданої вартості (див. табл. 3.2).

**Таблиця 3.2** – Ранжування ланцюгів за балами (*Джерело: складено автором*)

Критерій	Зважування (%)	Ланцюг створення вартості 1	Ланцюг створення вартості 2	Ланцюг створення вартості 3
Критерій 1	50%			
Критерій 2	15%			
Критерій 3	20%			
Критерій 4	15%			

Після того, як матриця складена, зацікавлені сторони складають рейтинг для кожного ланцюгу створення вартості, враховуючи наскільки кожен ланцюг доданої вартості відповідає цим критеріям. Поширеним варіантом цього методу є числовий рейтинг від 1 до 5, де 5 – це максимальна відповідність критеріям, а 1 – мінімальна. Присвоєння числових балів можна здійснити різними способами, включаючи збір числових рейтингів від усіх учасників групи зацікавлених сторін, а потім складання простого середнього значення. Техніка парного відбору може бути придатною для учасників, які добре розуміють виявлені потенційні ланцюги створення вартості. Попарний відбір здійснюється шляхом порівняння пари продуктів на основі кожного з критеріїв, запропонованих на кроці 1. Відбір по парах проводиться для кожного з критеріїв відбору (див. табл. 3.3).

**Таблиця 3.3** – Матричне ранжування продуктів за вибором пари (*Джерело: складено автором*)

	Ланцюг створення вартості 1	Ланцюг створення вартості 2	Ланцюг створення вартості 3	Ланцюг створення вартості 4
Ланцюг створення вартості 1	-			
Ланцюг створення вартості 2		-		
Ланцюг створення вартості 3			-	
Ланцюг створення вартості 4				-

Далі зацікавлені сторони роблять вибір пари на основі урахуванням кожного критерію, визначеного на кроці 1. Потім ці рейтинги можна об'єднати в загальний рейтинг на основі вагових коефіцієнтів, визначених у кроці 3.

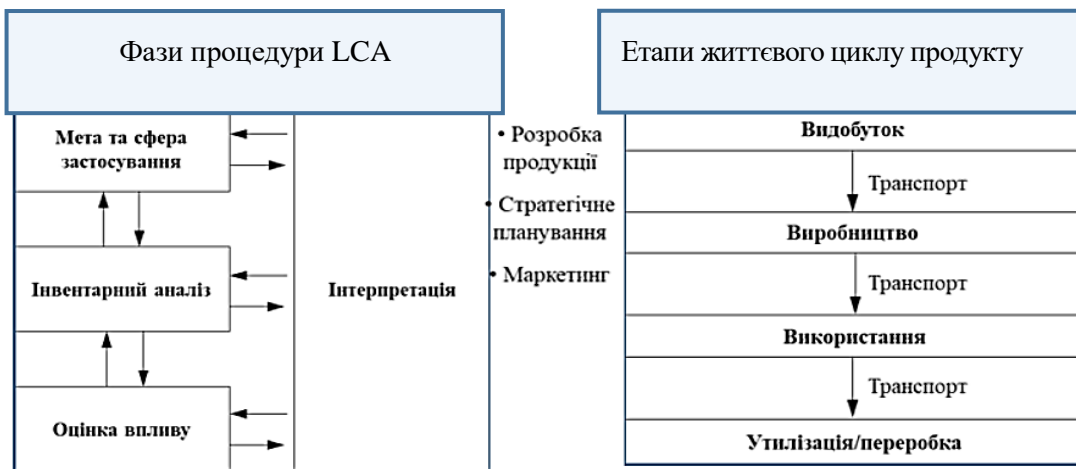
Для багатьох підприємств сталість ланцюга є ключовою корпоративною метою, оскільки вони використовують багато ресурсів та грошей і часто є джерелом непотрібних відходів. Компанії почали вимірювати екологічний та суспільний вплив своїх товарів та послуг від початку до кінця свого життєвого циклу. Такий метод називається Оцінка життєвого циклу (LCA). LCA – це методика оцінки різних аспектів, пов'язаних з розробкою продукту та його потенційним впливом протягом усього терміну служби виробу (тобто від колиски до могили) від придбання, переробки, виробництва, використання та, нарешті, його утилізації [12, с. 212].

Аналіз життєвого циклу товару дозволяє зробити комплексну оцінку еколого-орієнтованих змін всіх елементів ланцюга створення вартості. LCA метод включає визначення найзначніших впливів продукту на навколишнє середовище, вимір екологічних переваг, які можуть бути досягнуті шляхом удосконалення продукту. Результати оцінки дають можливість управляти вхідними та вихідними потоками і, як наслідок, підвищувати інтегральну ресурсну ефективність виробництва і мінімізувати вплив на навколишнє середовище [19]. Процедура методу LCA визначена стандартом ISO 14000<sup>12</sup>. Процес оцінки розділяється на фази відповідно до етапів життєвого циклу (див. рис. 3.4). При проведенні такого аналізу збираються дані про входи та виходи системи, пов'язані впливи ресурсів на навколишнє середовище тощо [20].

---

<sup>12</sup>*Ред.* LCA є одним з низки методів екологічного менеджменту (до таких належать також, наприклад, екологічний аудит, екологічний моніторинг, оцінка екологічного впливу проєктів та ін.). LCA не розглядається доцільним для використання у всіх ситуаціях, але екологічні заяви (або декларації екологічності), що добровільно приймаються підприємствами, можуть мати офіційне значення тільки тоді, якщо вони доведені методом LCA. Методичні основи застосування методу LCA визначені фундаментальними керівними документами: ISO 14040:2006 «Екологічний менеджмент. Оцінка життєвого циклу. Принципи та структурна схема»; та ISO 14044:2006 «Екологічний менеджмент. Оцінка життєвого циклу. Вимоги та керівні вказівки». Крім цих двох стандартів, ISO пропонує також низку методичних рекомендацій зі здійснення LCA, що вкладаються у технічних звітах (*англ.* Technical Reports) та умовах (*англ.* Technical Specifications), зокрема: ISO/TR 14047:2012, ISO/TS 14048:2002, ISO/TR 14049:2012, ISO/TS 14071:2014, ISO/TS 14072:2014 (див.: <https://www.iso.org/obp/ui#home>).

Загалом метод LCA застосовується: (1) для пошуку можливостей поліпшення екологічних характеристик продукції на різних етапах їх життєвого циклу; (2) для інформування осіб, які приймають рішення в промисловості, урядових та неурядових організацій – наприклад, при стратегічному плануванні, визначенні пріоритетів, розробці чи модернізації продукції чи процесів; (3) при виборі відповідних показників екологічної ефективності, включаючи методики проведення вимірювань; (4) у маркетингу – наприклад, при реалізації схеми екологічного маркування, складанні заяви про екологічний позов або розробленні декларації з екологічно чистої продукції (див.: ISO 14040:2006/Amd 1:2020 «Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework»).



**Рисунок 3.4** – Фази та етапи методу LCA (Джерело: [20])

Традиційно більшість екологічних проблем не пов’язуються з впливами протягом життя продукту – компанії фокусуються на усуненні негативних наслідків, які стали заважати їх розвитку. За методом LCA вивчаються періоди життя продукту задовго до його виготовлення, починаючи з видобутку і транспортування сировини. При проведенні системного аналізу з’являється можливість ідентифікувати перспективи і передбачити екологічне навантаження по всіх стадіях життєвого циклу продукту [21]. Метод LCA зазвичай ув’язується із завданнями охорони довкілля і збереження біорізноманіття, раціонального використання природної сировини і споживання енергії, зниження викидів CO<sub>2</sub>, зменшення впливу транспорту на навколишнє середовище тощо. Розглянемо основні особливості цього методу.

Процедура LCA складається з чотирьох фаз [20]:

1) Визначення цілі і сфери застосування LCA (*англ.* Goal Definition and Scoping). Ключовим елементом у визначенні сфери застосування LCA є вибір об’єкта дослідження – функціональної одиниці, за яку приймається продукт чи послуга, вплив якої буде оцінюватися і порівнюватися (див. рис. 3.5).

Визначення цілі	Сфера застосування – обумовлює рамки дослідження	
<p>У цілі має бути зазначено:</p> <p><u>Передбачуване використання</u></p> <p><u>Причини навчання</u></p> <p><u>Аудиторія</u></p> <p><u>Порівняльна та розкрита для громадськості</u></p>	<p><u>Сфера застосування</u></p> <p><u>включає:</u></p> <p><u>Система продуктів</u></p> <p><u>Функції систем</u></p> <p><u>Функціональний блок</u></p> <p><u>Межа системи</u></p> <p><u>Процедури розподілу</u></p> <p><u>Категорії впливу, метод оцінки та тип інтерпретації</u></p>	<p>Вимоги до даних</p> <p>Припущення</p> <p>Обмеження</p> <p>Вимоги до якості початкових даних</p> <p>Тип критичного огляду, якщо такий є</p> <p>Тип та формат звіту</p>

**Рисунок 3.5** – Визначення мети та галузі дослідження LCA (Джерело: [20])

**Глава 3 Дослідження факторів, що впливають на сталий розвиток у промислових ланцюгах створення вартості**

---

2) Інвентаризаційний аналіз включає аналіз вхідних і вихідних потоків системи і збір даних для проведення дослідження. Відомості про величину споживаної енергії і матеріалів, кількості забруднюючих речовин, що надходять в навколишнє середовище тощо збираються по кожному процесу всього життєвого циклу функціональної одиниці.

3) Оцінка діяльності життєвого циклу передбачає оцінку потенційних можливостей впливу системи навколишнього середовища на основі даних інвентаризаційного аналізу. Цей етап методологічно є найскладнішим. Вибираються категорії впливу, означення та характеристики. Результати оцінки групуються за видами можливого впливу (див. табл. 3.4).

**Таблиця 3.4** – Основні показники оцінки (Джерело: складено за [20])

Група	Опис
1. Виснаження ресурсів	Впливи, пов'язані з видобутком сировинних ресурсів для виробництва продуктів, матеріалів та енергії
2. Екологічний вплив використання земель	Вплив на рослинний і тваринний світ, спричинений біофізичними змінами, що накладаються на ландшафтному рівні протягом життєвого циклу продукту, послуги чи системи
3. Вплив парникових газів та чорного вуглецю	Впливи, пов'язані з парниковими газами та чорним вуглецем, з продуктами, послугами чи системами. Ці наслідки включають глобальні та регіональні (арктичні) зміни клімату, потепління океану та закислення океану
4. Викиди, пов'язані з регіональним впливом на навколишнє середовище	Регіональний вплив на навколишнє середовище, пов'язаний з викидами, продуктами чи системами. Такі викиди можуть бути пов'язані з кількома кінцевими точками навколишнього середовища
5. Викиди, пов'язані з впливом на здоров'я людини	Вплив на здоров'я людини через викиди, що пов'язані з продуктами чи системами. Такі викиди можуть бути пов'язані з багатьма кінцевими точками здоров'я людини
6. Наслідки небезпечних відходів	Ризики для навколишнього середовища або здоров'я людей, що пов'язані з небезпечними відходами, які не обробляються належним чином або не піддаються утилізації, і які потенційно можуть порушити умови зберігання протягом строку дії токсичності відходів

4) Інтерпретація життєвого циклу – етап, на якому результати аналізу оцінюються до встановлених цілей та областей дослідження, формуються висновки та рекомендації для прийняття відповідних рішень; також проводиться оцінка відповідності вимогам LCA до вимог методології та принципів.

За ISO 14044 всі фази методу використовують результати попередніх етапів. Ітеративний підхід у рамках системи та між етапами підтримує послідовність досліджень та уявлення про результати, а також можливість повернутися до попередньої стадії та зробити поправки у залежності від отриманих результатів [21].

Методика дозволяє підприємствам: 1) вибрати критерії для визначення потреб у ресурсах, необхідних для функціонування системи; 2) виділити певні компоненти системи, які спрямовані на раціональне використання ресурсів; 3) порівняти альтернативні варіанти матеріалів, продукції і процесів виробництва.

### **3.5 Управління сталістю у ланцюгах створення вартості**

Управління сталістю у ланцюгах створення вартості, що передбачає довгострокові виробничі відносини, потребує здійснення моніторингу досягнення загальних показників та узгодження маркетингової політики для запобігання конфліктів інтересів і збільшення вигід для усіх учасників процесу. Інтегратором політики у такому ланцюгу може стати один з учасників, який має найбільший вплив на інших партнерів і виконує функції проведення досліджень зовнішнього середовища та координації дій у каналі постачання задля отримання ними додаткових тисків. Реалізації даних функцій підприємством-інтегратором відбувається через надання рекомендацій кожному з учасників каналу.

На практиці процес виробництва продукції і доставка її кінцевому споживачу охоплює групу підприємств, яких може бути досить багато, кожне з яких спеціалізується на виконанні конкретних різновидів робіт або послуг. Підприємства взаємодіють між собою за різними маркетинговими формами – від разових трансакцій до тісної кооперації. Ідея полягає в тому, що за попарною координацією дій підприємств в окремих ланках ланцюгу можна не забезпечити оперативне реагування на зміни в інших його ланках. За цих умов підприємство-інтегратор повинно забезпечити загальну інтеграцію фізичного та маркетингового каналу.

Управління розвитком ланцюгу на засадах маркетингу гнучкого партнерства дозволить вирішити багато аспектів: визначити загальну перспективу і забезпечити стійкість поставок; оцінювати стан і ризики взаємовідносин уздовж каналу; досягти відкритості системи для всіх учасників; узгодити технічну політику для учасників партнерства; посилити гнучкість та ініціювати переформатування каналу для підвищення ефективності його функціонування.

Слід зазначити, що далеко не завжди таким інтегратором має бути виробник кінцевого продукту. Достатньо типовим є випадок, коли у розгалуженій системі взаємозв'язків найбільш впливовим на якість процесу створення продукту для кінцевого споживача має компанія, що не здійснює виробництво основних компонентів для кінцевого продукту, а займається їх сервісним обслуговуванням. Тобто, критичним є вплив окремого учасника на контрактні відносини у партнерстві, через який він може забезпечити функцію інтегратора. Інтегратор має найбільш високу економічну владу у вертикальному партнерстві підприємств.

На рис. 3.6 пропонуємо схему розробки стратегії взаємодії на основі маркетингу партнерських відносин, що передбачає виділення підприємства-інтегратора.



**Рисунок 3.6** – Етапи планування ланцюга створення вартості на основі маркетингу партнерських відносин

Як бачимо, перш за все необхідно визначитися з такими завданнями: 1) вибрати підприємство-інтегратора; 2) обґрунтувати коло учасників ланцюга створення вартості, які насамперед важливі для формування політики партнерських відносин. У якості основного критерію для вибору підприємства-інтегратора пропонується визначити силу впливу підприємства уздовж ланцюгу, що достатня для досягнення його сталості. Але залишається питання щодо методики оцінки ступеня впливу підприємства на сталість вертикального партнерства інших учасників уздовж всього ланцюга.



**Глава 3 Дослідження факторів, що впливають на сталий розвиток у промислових ланцюгах створення вартості**

Для виявлення інтегратора пропонується застосовувати показники ступеня залежності, що доцільно розрахувати шляхом присвоєння балів його детермінантам (фактичним показникам) методом експертної оцінки (див. табл. 3.5).

**Таблиця 3.5** – Детермінанти показника ступеня залежності від елементів ланцюга

Позначення	Найменування детермінант
Показники ступеня залежності від попереднього елемента ланцюга	
$\alpha_1$	диференціація та обсяги сировини, матеріалів, що закуповуються для виробництва продукції
$\alpha_2$	інформованість постачальника
$\alpha_3$	витрати на можливі зміни постачальника
$\alpha_4$	кількість альтернативних постачальників
$\alpha_5$	вагомість замовлень для постачальників у структурі його доходів
$\alpha_6$	кількість інших галузей, що мають потребу в продукції постачальника
$\alpha_7$	вартість закупівлі у співвідношенні з сукупними витратами підприємства
$\alpha_8$	вплив ціни означеного ресурсу на собівартість товару/послуги
Показники ступеня залежності від наступного елемента ланцюга	
$\beta_1$	концентрація покупців у порівнянні з концентрацією підприємств-конкурентів
$\beta_2$	обсяг закупівель покупцями
$\beta_3$	витрати покупців на зміну постачальника
$\beta_4$	вимоги до рівня стандартизації продукції
$\beta_5$	інформованість покупця
$\beta_6$	еластичність попиту (співвідношення ціни та загального обсягу закупівель)
$\beta_7$	очікувані вигоди споживача
$\beta_8$	наявність товарів – субститутів

Кожна детермінанта ступеню залежності від постачальника і від споживача розраховується за 6 бальною шкалою, де 0 – відсутній вплив; 5 – вплив дуже високий. Загальний індекс ступеню залежності одного підприємства від іншого розраховується як середнє арифметичне значення всіх його детермінант, що потім нормоване відносно одиниці. Цей ступінь залежності повністю визначає ступінь впливу одного підприємства на інше. Так, оцінка загального індексу ступеня залежності підприємства від попереднього елемента ланцюга постачання –  $d_n$ , розраховується за формулою:

$$d_n = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{5 \cdot n}, \quad (3.1)$$

де:  $n$  – кількість детермінант індексу ступеня залежності підприємства від попереднього елемента ланцюга постачання.

Відповідно оцінка загального індексу ступеня залежності підприємства від наступного елемента ланцюга постачань –  $d_n$ , розраховується за формулою:

$$d_n = \frac{\sum_{i=1}^k \beta_i}{5 \cdot k}, \quad (3.2)$$

де:  $k$  – кількість детермінант залежності підприємства від наступного елемента ланцюга постачань.

Слід зазначити, що кількість і перелік детермінант може бути змінені в залежності від галузі, в якій працює підприємство, стану зовнішнього середовища і особливостей продукції, на постачанні якої базується канал. В загальному випадку залежність  $j$ -го підприємства від  $i$ -го будемо позначати (ступень впливу  $i$ -го підприємства на  $j$ -те)  $d_{i,j}$ , а  $i$ -го від  $j$ -го –  $d_{j,i}$ .

Таким чином, формується базова матриця графу прямої взаємозалежності підприємств з нульовими елементами на головній діагоналі:

$$\begin{vmatrix} 0 & d_{1,2} & \cdots & d_{1,N} \\ d_{2,1} & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 0 & d_{(N-1),N} \\ d_{N,1} & \cdots & d_{N,(N-1)} & 0 \end{vmatrix}. \quad (3.3)$$

Окрім прямих взаємозалежностей між двома підприємствами, можуть мати місце і опосередковані – через інші підприємства, які розглядаються щодо участі в ланцюгу. Так, коли  $j$ -те підприємство безпосередньо не залежить від  $i$ -го, але залежить від  $k$ -го, а  $k$ -те підприємство, у свою чергу, залежить від  $i$ -го, то опосередкована залежність  $j$ -го підприємства від  $i$ -го будемо розраховувати як  $d_{(k)i,j}$ :

$$d_{(k)i,j} = d_{i,k} \cdot d_{k,j}. \quad (3.4)$$

Оскільки  $d_{i,k} \leq 1$  і  $d_{k,j} \leq 1$ , то  $d_{(k)i,j} \leq 1$ ,  $d_{(k)i,j} \leq d_{i,k}$ ,  $d_{(k)i,j} \leq d_{k,j}$ .

Відзначимо, що чисельне значення опосередкованої взаємозалежності завжди менше ніж чисельні значення будь-якої з величин у правій частині формули (3.4). У загальному випадку, коли шлях між вершинами графа  $j$  і  $i$  пролягає через декілька вершин ( $k, l, \dots, m$ ), то взаємозалежність на цьому шляху може бути вирахована як:

$$d_{(k,l,\dots,m)i,j} = d_{i,k} \cdot d_{k,l} \cdot \dots \cdot d_{m,j}. \quad (3.5)$$

У загальному випадку, між вершинами графа  $i$  і  $j$  може бути декілька шляхів, кожний з яких визначає взаємозалежність між підприємствами за формулою виду (2). Позначимо величини взаємозалежності за цими шляхами як  $d_{(\#)i,j}$ , де  $\#$  – номер шляху. При відомих шляхах між двома вершинами за кількістю  $R$  (алгоритми пошуку усіх шляхів між двома вершинами графу відомі з теорії графів визначення впливу між підприємствами будемо визначатиме за шляхом, який дає максимальний вплив.

Таким чином, елемент матриці графу повної взаємозалежності підприємств –  $D_{i,j}$ , при наявності  $R$  шляхів між вершинами  $j$  і  $i$  визначиться як:

$$D_{i,j} = \max_{r=1,\dots,R} \{d_{(r)i,j}\}.$$

Тоді матриця повної взаємозалежності підприємств, що входять до ланцюга, прийме вигляд:

$$\begin{vmatrix} 0 & D_{1,2} & \cdots & D_{1,N} \\ D_{2,1} & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 0 & D_{(N-1),N} \\ D_{N,1} & \cdots & D_{N,(N-1)} & 0 \end{vmatrix}.$$

Оскільки кумулятивна ступень залежності повністю обумовлює ступінь впливу, то вплив  $i$ -го підприємства –  $v_i$  може бути оцінений як:

$$v_i = \sum_{j=1}^N D_{j,i} + \sum_{j=1}^N D_{i,j} \tag{3.6}$$

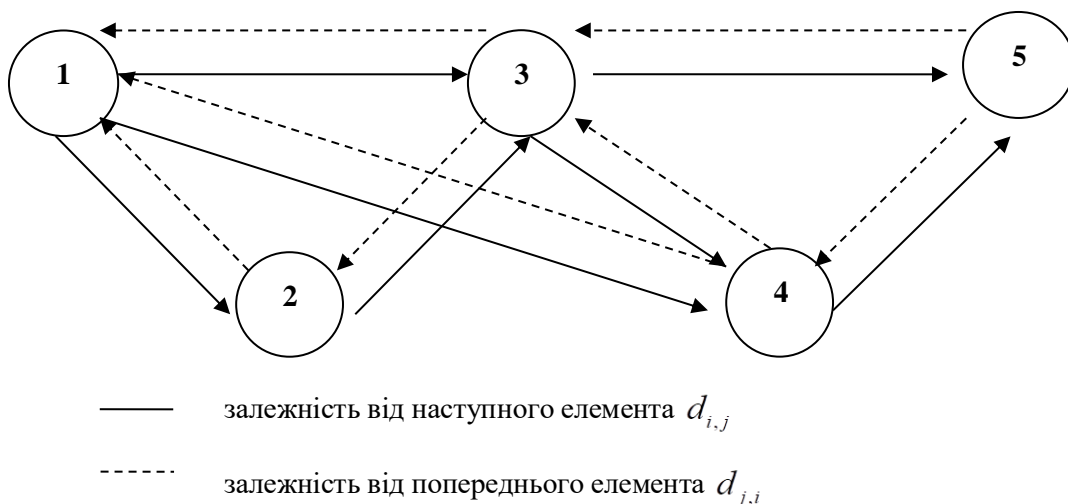
або, через нормування за 100 - бальною шкалою, через  $V_i$ :

$$V_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^N v_j} \cdot 100. \tag{3.7}$$

Тобто, підприємство, яке має найбільший ступінь впливу, що розраховується за формулами (3.6-3.7), і слід визначати як підприємство-інтегратор. Якщо загальний ступінь впливу окремого підприємства наближається до 100, то це характерно для формування системи з жорсткою вертикальною інтеграцією типу корпорації. Якщо показник наближається до 0, то відносини є конкурентними, або коло підприємств, які планується залучити до ланцюга, є надто широким, що не дає можливості встановити поглиблені партнерські відносини, тому партнерство важко реалізувати.

Оскільки ступень залежності повністю обумовлює ступінь впливу, то підприємство, яке за результатами аналізу має найбільший сумарний бал (приведений до 100 бальної шкали) ступенів впливу на учасників партнерства, обирається підприємством-інтегратором.

Розглянемо дану методику на прикладі ланцюга створення вартості промислової продукції для підприємств гірничого машинобудування та гірничодобувної промисловості (див. рис. 3.7). Це є послідовний канал взаємодії постачальників сировини, матеріалів, виробників комплектуючих для виготовлення обладнання, виробників обладнання, виробників комплектуючих та витратного інструменту для функціонування обладнання та підприємств добувної промисловості. Кожне підприємство є або попереднім, або наступним елементом технологічного ланцюга, до якого залучені підприємства різних галузей. Обробку даних проведено за допомогою програмного забезпечення SPSS.



**Рисунок 3.7** – Взаємозв’язок підприємств в ланцюгу створення вартості

(Джерело: побудовано автором)

1 – постачальники сировини, матеріалів; 2 - виробники комплектуючих для виготовлення обладнання; 3 – виробники обладнання; 4 – виробники комплектуючих та витратного інструменту; 5 – підприємства-споживачі (добувної промисловості)

Для встановлення прямого ступеня залежності ( $d_{i,j}$ ,  $d_{j,i}$ ) підприємств у ланцюгу на прикладі підприємств гірничого машинобудування та добувної промисловості був використаний метод експертних оцінок (метод Дельфі).

**Глава 3 Дослідження факторів, що впливають на сталий розвиток у промислових ланцюгах створення вартості**

Експертами виступали науковці і фахівці галузі, менеджери спеціалізованих підприємств. Методом відбору експертів до вибірки респондентів був метод «снігової кулі». Оцінка достовірності отриманих результатів показала високий ступінь узгодженості думок експертів, про що свідчить коефіцієнт конкордації 0,74. Результати дослідження ступеня прямої взаємозалежності у загальному каналі постачань на прикладі підприємств добувної промисловості та гірничого машинобудування наведені нижче в табл. 3.6.

**Таблиця 3.6** – Розрахунок ступеня прямої взаємозалежності у промисловому ланцюгу створення вартості на прикладі підприємств добувної промисловості та гірничого машинобудування

		Ланцюг (ступінь залежності, кількість балів)					
		Постачальники сировини, матеріалів	Виробники комплектуючих для виготовлення	Виробники обладнання	Виробники комплектуючих та витратного інструменту	Підприємства – споживачі (добувної промисловості)	
		1	2	3	4	5	
Ланцюг ступінь залежності, кількість балів	Постачальники сировини, матеріалів	1	0	0,4	0,5	0,5	0
	Виробники комплектуючих для виготовлення обладнання	2	0,2	0	0,5	0	0
	Виробники обладнання	3	0,2	0,7	0	0,7	0,6
	Виробники комплектуючих та витратного інструменту	4	0,2	0	0,6	0	0,8
	Підприємства добувної промисловості	5	0	0	0,5	0,9	0

Проведений аналіз дозволив встановити, що найбільша залежність у партнерстві на прикладі гірничого машинобудування та добувної промисловості проявляється від підприємства з виробництва комплектувальних виробів та витратного інструменту.

Оскільки виробники гірничого обладнання, добувні підприємства, виробники комплектуючих для виготовлення обладнання та постачальники сировини і матеріалів, як правило, є учасниками декількох ланцюгів одночасно, де можуть бути як у якості підприємства-інтегратора партнерства, так і в якості партнера без повноважень підприємства-інтегратора, це породжує відсутність тісної залежності між вказаними партнерами.

Тепер визначимо елементи матриці графу повної взаємозалежності підприємств –  $D_{i,j}$  та  $D_{j,i}$  з урахуванням множини шляхів між вершинами  $j$  і  $i$  (див табл. 3.7).

**Глава 3 Дослідження факторів, що впливають на сталий розвиток у промислових ланцюгах створення вартості**

**Таблиця 3.7** – Розрахунок ступеня повної взаємозалежності у промисловому ланцюгу створення вартості на прикладі підприємств добувної промисловості та гірничого машинобудування

		Ланцюг (ступінь залежності, кількість балів)					$\sum_{j=1}^N D_{j,i}$	
		Постачальники сировини, матеріалів	Виробники комплектуючих для виготовлення обладнання	Виробники обладнання	Виробники комплектуючих та витратного інструменту	Підприємства – споживачі (добувної промисловості)		
		1	2	3	4	5		
Ланцюг ступінь залежності, кількість балів	Постачальники сировини, матеріалів	1	0	0,4	0,5	0,5	0,4	1,8
	Виробники комплектуючих для виготовлення обладнання	2	0,2	0	0,5	0,35	0,3	1,35
	Виробники обладнання	3	0,2	0,7	0	0,7	0,6	2,2
	Виробники комплектуючих та витратного інструменту	4	0,2	0,28	0,6	0	0,8	1,88
	Підприємства добувної промисловості	5	0,18	0,378	0,5	0,9	0	1,958
	$\sum_{i=1}^N D_{i,j}$		0,78	1,758	2,1	2,45	2,1	$\Sigma$
Загальний ступінь взаємовпливу $v_i = \sum_{j=1}^N D_{j,i} + \sum_{i=1}^N D_{i,j}$		2,58	3,108	4,3	4,33	4,058	<b>18,376</b>	
Загальний ступінь впливу учасників (за 100 бальною шкалою)		14,04	16,91	23,40	23,56	22,08	<b>100</b>	

### 3.6 Висновки

Підтверджено, що поведінку складних адаптивних систем, таких як поглиблене партнерство, не можна передбачити достатньо точно. Головною особливістю систем є їхня здатність до самоорганізації, адаптування до змін і створення нових структур і систем під час відсутності формальної влади.



Отже, менеджери повинні забезпечити спроможності компаній до організації такого партнерства з виділенням підприємства-інтегратора. Головне питання полягає в тому, наскільки вони здатні вибрати структури, системи і стилі управління, які дозволять цим здібностям до організації дати найкращі результати та забезпечити інтегратора необхідною інформацією та повноваженнями. Основною схемою є концепція ситуаційного аналізу, яка полягає в тому, щоб спроектувати такі організаційні системи, які дали б партнерству максимальну можливість досягти найвищого рівня ефективності (відповідності) діяльності.

За результатами проведених досліджень з'ясовано, що умовою ефективності механізму стратегічного управління партнерством у ланцюгу створення вартості є встановлення взаємозалежності підприємств у партнерстві. Формування стратегії взаємодії підприємств на засадах гнучкого партнерства з виділенням підприємства-інтегратора забезпечується на основі встановлення взаємозв'язків і визначення пропорцій між учасниками взаємодії. Для цього необхідно визначити характер внутрішніх взаємозв'язків між стратегіями підприємств і дати їх кількісну оцінку. Виявлення внутрішніх взаємозв'язків розвитку партнерства здійснюється за допомогою ситуаційного аналізу, яке проводиться підприємством-інтегратором.

Показано, що значення та ступінь впливу підприємств з виробництва витратних матеріалів та комплектуючих у загальному ланцюзі створення вартості гірничодобувної продукції зростає. Обслуговування підприємств витратними матеріалами та комплектуючими не є профільним завданням для виробників гірничого обладнання. За результатами розрахунків визначено, що ступінь залежності партнерів від обслуговуючих підприємств з виробництва витратних інструментів та комплектуючих є високою. Отже, формування вертикальних партнерств на базі виділення підприємством-інтегратором обслуговуючого підприємства з виробництва витратних інструментів є найбільш раціональним.

### **Список використаних джерел**

- 1 Palekhov, D. Palekhova, L. (2019) Responsible Mining: Challenges, Perspectives and Approaches. *Giovannucci D., Hansmann B., Palekhov D., Schmidt M. (Eds.). Sustainable Global Value Chains. Natural Resource Management in Transition.* Vol. 2. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. P. 521-544. DOI: 10.1007/978-3-319-14877-9\_28.
- 2 Wang, N., Jiang, Q., Jiang, B., & He, Z. (2022). Enterprises' Green Growth Model and Value Chain Reconstruction: Theory and Method. Springer.
- 3 Hauge, J. (2020). Industrial policy in the era of global value chains: Towards a developmentalist framework drawing on the industrialisation experiences of South Korea and Taiwan. *The World Economy*, 43(8), 2070-2092.
- 4 Ahmed, H., et al. (2024). Innovative Approaches to Sustainable Supply Chain Management / Ahmed, H., Al Bashar, M., Taher, M. A., Rahman, M. A. In: *The Manufacturing Industry: A Systematic Literature Review. Global Mainstream. Journal of Innovation, Engineering & Emerging Technology*, 3(02), 01-13.

- 5 Palekhova, L., Palekhov, D. (2016). Conceptual framework for balancing economic growth and environmental sustainability at regional level. *Scientific Bulletin NMU*, (1), 144-148.
- 6 Резнікова, Н. В., et al. (2022). Промислові екосистеми в глобальних ланцюжках створення вартості та поставок: кластери, інноваційні та екоіндустріальні парки як чинник сталого розвитку / Резнікова Н. В., Панченко В. Г., Русак Д. М., & Іващенко О. А. *Вісник Маріупольського державного університету. Серія: Економіка*, 23, 5-16.
- 7 Duginets, G. V. (2017). Added Value, as a Criterion for Evaluating the Efficiency of Global Production Chains. *Механізм регулювання економіки*, (1), 29–36.
- 8 Lund, S., et al. (2020). Risk, resilience, and rebalancing in global value chains. *McKinsey Global Institute*. URL: <http://dln.jaipuria.ac.in:8080/jspui/bitstream/123456789/14300/1/Risk-resilience-and-rebalancing-in-global-value-chains-full-report.pdf>.
- 9 Porter, M. E. (1989). Industry structure and competitive strategy: Keys to profitability. *Financial Analysts Journal*, 36 (4), 30–41.
- 10 Howarth, N., Galeotti M., Lanza A. et al. (2017). Economic development and energy consumption in the GCC: an international sectoral analysis. *Energy Transit*, 1, 6 <https://doi.org/10.1007/s41825-017-0006-3>.
- 11 Palekhova, L. (2015). Problem of responsible production in the energy sector. Proceedings of the International workshop “Energy supply and energy efficiency”, TU Azerbaijan, Baku, 21.09.2015 - 27.09.2015. Brandenburg University of Technology Cottbus – Senftenberg. 13-15.
- 12 Палехова, Л. Л. (2020). Управління сталим розвитком: довідник базових понять. Дніпро: НТУ «Дніпровська Політехніка», 332 с.
- 13 Палехова, Л., Шмідт М., Палехов Д. (2016). Добровільна екологічна сертифікація як спосіб просування на ринку. *Управління сталим розвитком в умовах перехідної економіки: монографія. 2-вид, перер. та доп.* Дніпропетровськ-Коттбус: НГУ-БТУ, 352-368.
- 14 Palekhov, D. (2014). Potential for Strategic Environmental Assessment (SEA) as a Regional Planning Instrument in Ukraine. *Umweltrecht in Forschung und Praxis*, Band 66. Hamburg: Dr. Kovač, (374). ISBN 978-3-8300-7896-8.
- 15 Lyu, X., Zhang, T., Yuan, L., & Fang, J. (2023). Prospects for the transformation and development of carbon storage in abandoned mines of coal enterprises from the perspective of carbon neutrality. *International Journal of Coal Science & Technology*, 10(1), 36.
- 16 Connell, J., Agarwal, R., & Dhir, S. (Eds.). (2018). *Global value chains, flexibility and sustainability*. Springer.
- 17 Awan, U., Sroufe, R., & Bozan, K. (2022). Designing value chains for industry 4.0 and a circular economy: A review of the literature. *Sustainability*, 14(12), 7084.
- 18 Gereffi, G., Fernandez-Stark, K., Psilos, P. (2011). *Skills for upgrading: Workforce development and global value chains in developing countries*. Duke University: Center on Globalization, Governance and Competitiveness. RTI International.
- 19 Палехова, Л. (2016). Проблема інтеграції у глобальні ланцюги створення вартості. *Управління сталим розвитком в умовах перехідної економіки: монографія. 2-вид, пров. та дод.* Дніпропетровськ-Коттбус: НГУ-БТУ, 315-324.
- 20 ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. URL: <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- 21 Palekhova, L. (2014). Economic instruments for integrating climate change considerations into development strategies of industrial regions in Ukraine – experience and issues. *Implementing Adaptation Strategies by Legal, Economic and Planning Instruments on Climate Change / Environmental Protection in the European Union*. Volume 4. Springer Verlag, 197-206.
- 22 Palekhov, D., Paliekhova, L. (2022). Responsible consumption and production in industrial value chains. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: Shvets V., Paliekhova L. Dnipro-Cottbus: Accent, 16-30.

## **INVESTIGATING THE FACTORS AFFECTING THE SUSTAINABILITY IN INDUSTRIAL VALUE CHAINS**

**Tetiana Kuvaieva\***

**Keywords:** sustainable development, industrial value chains, technical and technological factors of sustainable development, heavy engineering, Ukraine.

**The main objective of this study** was to improve the methodological approach to assessing the sustainability of development in industrial value chains, and to understand the factors that need to be taken into account when modeling partnerships along industrial value chains.

**Methodology.** Research papers related to issues of sustainability management in industrial value chains provided a theoretical and methodological basis for this study. The analysis also uses economic and mathematical methods, in particular matrix analysis methods.

**Findings.** Summarizing and analyzing information from scientific sources, we can conclude that the trend of the partnerships for sustainable development in Ukrainian value chains will actively grow. Discussions in this chapter took two main directions. Firstly, we studied scientific views on the concept of sustainable development management in industrial value chains, and the main factors of sustainability of interconnected industrial sectors – from mining enterprises to processing industries. Secondly, the methodological problems of choosing partnerships of the main participants in the industrial value chain are analyzed. In this case, the task was to assess the strength of production connections between different participants in production processes and select an integrator enterprise.

**Conclusions and Recommendations.** In the context of industrial value chain, sustainable management is a management concept that goes beyond the achievement of production efficiency indicators, market strategies, and supply and sales acts of an individual enterprise. It is established that partnership of business structures that carry out production and economic activities and actively cannot achieve sustainable development if there is no coordinator in it. The coordinator may be the enterprise that has the strongest set of connections with the main participants in the production value chain. At the same time, vertical partnerships along the production chain can be most powerful if the coordinator is an enterprise producing equipment or tools for the needs in this chain.

---

\***Tetiana Kuvaieva** – Associate Professor, Associate Professor the Department of Marketing, Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: [kuviaeva.t.v@nmu.one](mailto:kuviaeva.t.v@nmu.one); [orcid.org/0000-0002-8796-3189](https://orcid.org/0000-0002-8796-3189).

## ГЛАВА 4

# МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОЇ СИСТЕМИ

Світлана Ус, Любов Тимошенко\*

**Анотація.** Удосконалено методичний підхід до обґрунтування прийняття управлінських рішень щодо функціонування та розвитку підприємницької структури як еколого-економічної системи на підставі застосування когнітивного моделювання. Побудовано когнітивну модель діяльності компанії паливно-енергетичного комплексу з урахуванням еколого-економічних аспектів. На її основі проведено прогнозування стану підприємницької структури та визначено керувальні впливи, які забезпечують досягнення бажаних еколого-економічних показників діяльності компанії за певний період часу. Доведено, що когнітивне моделювання доцільно застосовувати для підвищення обґрунтованості прийняття управлінських рішень при виробленні сценарію досягнення бажаного стану підприємницької структури з урахуванням певного рівня забезпечення природоохоронної діяльності.

**Ключові слова:** еколого-економічна система, підприємницька структура, завдання сталого розвитку, системний підхід, когнітивний аналіз, керувальний вплив.

### 4.1 Вступ

Суб'єкти підприємницької діяльності сфери виробництва відіграють важливу роль у соціально-економічному розвитку країни забезпечуючи зайнятість населення та насичення ринку різноманітними товарами і послугами для задоволення суспільних потреб. Однак безвідповідальне зростання обсягів промислового виробництва посилює техногенне навантаження на навколишнє природне середовище, сприяє появі екологічних проблем, які несуть загрози умовам життєдіяльності населення, формуючи гуманітарні проблеми.

Зрозуміло, що успішне господарювання суб'єктів бізнесу потребує узгодженості їх економічної результативності, екологічної безпеки та соціальної діяльності, тобто збалансованості економічної, екологічної та соціальної сфер, що відповідає принципам сталого розвитку.

---

\*Світлана Альбертівна Ус – канд. фіз-мат. наук, доцент, професор кафедри системного аналізу та управління, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна. E-mail: Us.s.a@nmti.one; <https://orcid.org/0000-0003-0311-9958>. Любов Вікторівна Тимошенко – канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри прикладної економіки, підприємництва та публічного управління, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна. E-mail: Tymoshenko.L.V@nmti.one; <https://orcid.org/0000-0003-4869-8244>.

Концепція сталого розвитку стає всесвітньо визнаною ідеологією, починаючи з 1987 року, коли комісія Г. Х. Брундтланд публікує доповідь «Наше спільне майбутнє» (англ. «*Our common future*») і окреслює принципи глобального сталого розвитку. Центральною ідеєю нової концепції всесвітнього розвитку є вимоги до нинішнього покоління здійснювати свою життєдіяльність таким чином, щоб не зменшувати можливості майбутніх поколінь задовольняти свої власні потреби. Г. Х. Брундтланд підкреслює, що досягнення сталого розвитку потребує не тільки відповідних активних дій владних структур національного та регіонального рівня, а й залучення бізнесу, громадськості, науковців до розв'язання стратегічних проблем.

У вересні 2015 року в рамках 70-ї сесії Генеральної Асамблеї ООН у Нью-Йорку відбувся Саміт ООН зі сталого розвитку, на якому підсумковим документом «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року» було затверджено 17 Цілей Сталого Розвитку (або ЦСР). В Україні, як і в інших країнах-членах ООН, було започатковано інклюзивний процес адаптації ЦСР на засадах принципу «Нікого не залишити осторонь» з урахуванням специфіки національного розвитку та визначенням завдань за кожною ціллю [8].

З накопиченням знань та досвіду теорія сталого розвитку сьогодні продовжує конкретизуватися, зокрема стосовно понять, принципів, вимірів, стратегій, методів управління тощо. Економічна складова визначається стрижнем досягнення цілей сталого розвитку. Тому О. В. Прокопенко пропонує визначати сталий розвиток, як розвиток економіки, котрий поліпшує умови життя людини, а вплив на навколишнє середовище залишається у межах господарської ємності біосфери, тому не руйнується природна основа функціонування людства [10]. Л. Л. Палєхова уточнює, що економічну сталість треба розуміти як «досягнення стабільно високих економічних результатів для задоволення економічних потреб людей і суспільства в цілому, прагнучі одночасно до попередження диспропорцій з іншими основними цілями розвитку – забезпечення соціальної справедливості та збереження природного середовища на довгострокову перспективу» [9].

Стосовно первинної ланки у структурі національної економіки – підприємства, у літературі поняття «сталий розвиток» усталено розглядається як антикризовий, невпинний процес управління, що має на меті підвищення економічної ефективності діяльності підприємства з одночасним зростанням рівня відповідальності перед партнерами, клієнтами та робітниками, а також цілеспрямованими заходами щодо збереження довкілля та покращення якості навколишньої спільноти та майбутнього покоління [1– 4]. Підприємницькі структури повинні робити реальні кроки на шляху до сталого розвитку, а встановлення власних завдань з ЦСР мають допомогти компаніям перейти від короткострокового мислення до довгострокового, сприяти перебудові своєї компанії, бізнес-моделей і процесів та сформувати відповідальні ланцюги партнерів і постачальників навколо нових цілей сталості.

Огляд сучасних публікацій показує, що при дослідженні економічних та екологічних явищ, особливо на рівні виробничо-господарських процесів самостійних суб'єктів господарювання, науковці активно використовують системно-ситуаційний підхід. Так, З. Я. Шацька наголошує, що комплексне вивчення підприємницької структури потребує розглядати її як складний об'єкт, але єдину цілісну систему [17].

Досліджуючи дефініцію «сталий» у понятті «сталий розвиток», В. С. Загорський відзначає його «подвійне навантаження» [4], а саме: з одного боку, економічний розвиток забезпечує стійкий стан навколишнього середовища, а з іншого – стале економічне зростання. З огляду на це, екологічну та економічну складову необхідно розглядати єдиною системою і правильно керувати нею. З. П. Дзуліт [2] при дослідженні підприємств залізничного транспорту наголошує на феномені економіко-екологічного управління як ефективної альтернативи з метою одночасного збереження вигідних ринкових позицій підприємств та максимального зменшення навантаження на довкілля. Р. І. Розум та ін. [12] стверджують, що об'єднуючою ланкою між екологічною та економічною підсистемами є сфера природокористування, яка є основою для забезпечення реалізації економічних процесів, оскільки без елементів природних ресурсів неможливо здійснювати підприємницьку діяльність.

Р. І. Жовновач [3], відзначає, що категорію «еколого-економічна система» уведено до наукового обігу паралельно із формуванням концепції сталого розвитку у 70-х роках ХХ ст. та аналізує наукові підходи до трактування сутності еколого-економічної системи. Вчений пропонує виокремити декілька підходів, які характеризують сутність еколого-економічної системи: просторово-функціональний, ресурсний, системно-синергетичний, комплексний, структурно-динамічний.

Зазначимо, що еколого-економічну систему можна розглядати на різних рівнях управління розвитком: макrorівні (національному), мезорівні (регіональному) та мікрорівні (окремої підприємницької структури). У літературі цілями управління еколого-економічною системою виступають, зокрема: формування, розподіл, перерозподіл засобів виробництва на рівні виробничої системи; створення умов раціонального використання природних ресурсів для забезпечення стійкого та ефективного функціонування підприємства; створення екологічно безпечних умов для праці та життя. Досягнення вказаних цілей буде сприяти забезпеченню реалізації завдань ЦСР як на національному, так і на регіональному й місцевому рівнях [4].

Науковці при визначенні вихідних умов сталого розвитку еколого-економічної системи акцентують увагу на необхідності переходу від стихійності до керованості процесів розвитку, що передбачає виконання наступних дій: оцінка стану та динаміки розвитку об'єкту управління, для чого потрібна загально визнана система індикаторів; прогнозування еколого-економічної ситуації; розробка стратегічного бачення розвитку та стратегічних показників-орієнтирів, які мають бути досягнуті при необхідних управлінських впливах за певний період часу [2].



Зрозуміло, що деякі види діяльності характеризуються особливо високим рівнем техногенного навантаження на навколишнє природне середовище. В Україні такими є, зокрема, паливно-енергетичний комплекс, вуглевидобувні підприємства, цементні заводи та аграрний сектор. Для них існують спеціальні законодавчі обмеження та міжнародні вимоги, наприклад, щодо викидів парникових газів.

Застосування когнітивного моделювання дозволяє встановити сценарій розвитку подій при існуючому наборі взаємозалежних факторів. У літературі підкреслюється, що специфіка застосування когнітивного моделювання полягає в їх орієнтованості на конкретні умови розвитку системи в тій або іншій предметній області [6]. І. В. Ялдин [18] визначає переваги когнітивного моделювання при управлінні та прогнозуванні сталого розвитку інтегрованих структур бізнесу.

В роботі О. Я. Колещука [5] запропоновано формування стратегічних сценаріїв управління інноваційністю машинобудівних підприємств на основі когнітивного моделювання. Проте, як свідчить представлений огляд наукових джерел, певні питання методики застосування когнітивного моделювання для аналізу еколого-економічних аспектів функціонування підприємницької структури потребують подальшого удосконалення.

Метою представленого дослідження є розробка методичного підходу до застосування методів когнітивного моделювання у процесах розробки управлінських рішень для забезпечення сталого розвитку підприємницької структури як складної еколого-економічної системи. Робота охоплює низку проблемних сфер: когнітивне моделювання – для дослідження процесів впливу економічної діяльності підприємницької структури на стан довкілля; багатовимірний регресійний аналіз – для визначення коефіцієнтів впливу факторів когнітивної моделі на цільові показники; когнітивний аналіз та імпульсне управління – для проведення числових експериментів і визначення оптимальної стратегії управління з метою досягнення бажаного стану сталого розвитку.

## **4.2 Особливості моделюванні еколого-економічних систем**

Еколого-економічні системи являють собою сукупність об'єктів виробничої діяльності людини і природи та їх взаємодію. З точки зору системного аналізу, такі системи є слабоструктурованими, оскільки шляхи взаємодії природних та виробничих об'єктів неможна описати із достатньою повнотою. Їх функціонування пов'язане з великим набором факторів (параметрів), причому не всі з них відомі заздалегідь. Зв'язки між факторами також часто є неявними, їх складно визначити, оскільки взаємодія відбувається опосередковано – через низку інших факторів. Крім того, і самі фактори, і зв'язки між ними іноді не відомі заздалегідь і можуть визначатися лише в процесі дослідження.

Відтак, еколого-економічні системи неможливо описати використовуючи лише аналітичні залежності. Саме тому для дослідження можливих сценаріїв розвитку, а також для визначення шляхів досягнення бажаного стану системи через цілеспрямовані управлінські впливи доцільно використовувати когнітивний аналіз.

Такий підхід до моделювання і управління слабо-структурованими системами передбачає розробку формальних методів і моделей, які містять або враховують когнітивні можливості (розуміння, сприйняття, пояснення, уявлення), підтримуючи інтелектуальний процес при вирішенні завдань управлінського характеру [7]. Його сутність полягає в тому, що складні процеси і системи відображаються у спрощеному, інтуїтивно-зрозумілому вигляді, який дозволяє дослідити можливі сценарії розвитку системи.

До основних напрямків використання когнітивних моделей належать такі: аналіз впливів; аналіз динаміки зміни стану або прогноз розвитку ситуації; аналіз стійкості; сценарний аналіз; пошук управлінських впливів; оцінювання і інтерпретація прогнозів розвитку ситуації.

Дослідники приводять різний перелік етапів когнітивного аналізу, схематичний огляд яких проводять О. В. Манойленко і М. Ягі [7]. Методики розрізняються у деталях, але співпадають у головному. У цілому проведення когнітивного аналізу вимагає виконання таких кроків:

- 1) сформулювати мету і завдання дослідження;
- 2) вивчити проблемну ситуацію з позиції поставленої мети, що означає збір, систематизацію та аналіз інформації щодо системи і її зовнішнього середовища, визначення властивих досліджуваній ситуації вимог, умов і обмежень;
- 3) виділення основних факторів, що впливають на розвиток ситуації;
- 4) визначення взаємозв'язку між факторами (побудова когнітивної карти у вигляді орієнтованого графа);
- 5) вивчення сили взаємовпливу різних факторів; для цього використовуються як математичні моделі, які описують деякі точно виявлені кількісні залежності між факторами, так і суб'єктивні уявлення експерта щодо формалізації якісних взаємин факторів;
- 6) перевірка адекватності отриманої на попередніх кроках когнітивної моделі (верифікація когнітивної моделі);
- 7) дослідження за допомогою когнітивної моделі можливих варіантів розвитку системи та виявлення шляхів, механізмів впливу на ситуацію з метою досягнення бажаних результатів.

Кроки 3 – 5 описують побудову когнітивної моделі у вигляді зваженого графу, кроки 6 та 7 – дослідження і використання отриманої моделі.

Класична когнітивна карта (КК) являє собою зважений орієнтований граф, в якому вершини відповідають факторам (показникам), суттєвим для досліджуваної ситуації, а дуги описують зв'язки між цими факторами. Як правило, серед вершин виділяють одну або кілька таких, що є цільовими і відповідають встановленим показникам, і деяку множину вершин, якими можна керувати і подавати на них управлінські впливи з метою досягнення бажаних значень цільових вершин.

Отже, маємо такі основні елементи моделі: набір параметрів, що описує вихідний (початковий) стан системи, набір параметрів, що описує її кінцевий (або бажаний) стан та управління яке застосовується (або ні) у системі (див. рис. 4.1).

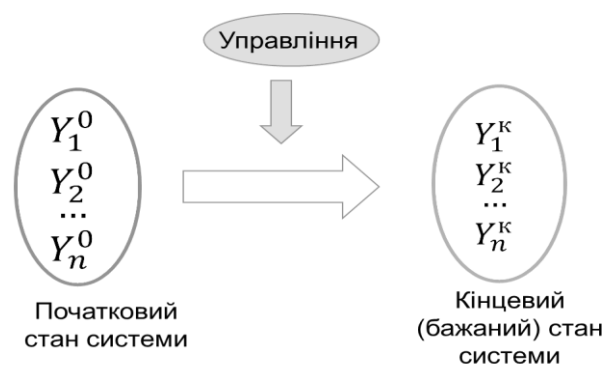


Рисунок 4.1 – Схема когнітивного аналізу (Джерело: побудоване авторами)

Кожен з цих елементів може бути невизначеним і підлягати визначенню під час дослідження. Виходячи з цього, ми можемо розв'язувати різні види задач стосовно функціонування еколого-економічних систем, а саме:

- *Прогнозування стану системи через заданий проміжок часу.* Відомо початковий стан системи та принципи і умови її функціонування, визначити стан у якому буде система через певний період, якщо умови залишаються сталими.
- *Прогнозування стану системи з урахуванням управлінських впливів.* Відомо початковий стан системи і управління яке планується застосувати, визначити стан системи через певний період, за умови, що управлінські заходи будуть застосовані.
- *Визначення управлінських впливів, які необхідно застосувати, щоб привести систему до бажаного стану.* Відомо початковий стан системи та бажаний її стан через заданий період часу. Необхідно визначити заходи управління, які необхідно застосувати, щоб привести систему до заданого стану.

Таким чином, когнітивні карти дозволяють здійснювати статичний аналіз, тобто аналіз досліджуваної ситуації за допомогою вивчення структури взаємних впливів концептів когнітивної карти, та динамічний аналіз, який полягає у генерації можливих сценаріїв розвитку ситуації у часі.

Розв'язування цих задач включає наступні етапи:

- 1) побудова когнітивної моделі системи, враховуючи економіко-екологічні аспекти;
- 2) дослідження динаміки основних показників, що описують функціонування системи протягом заданого періоду;
- 3) визначення керувального впливу, за якого досягаються бажані показники діяльності підприємницької структури (стан системи) за певний період часу.

Зауважимо, що є дві основні проблеми, які виникають перед дослідниками при побудові когнітивної моделі. Перша – це визначення і ранжування факторів, тобто елементів системи, які є суттєвими для дослідження даної ситуації. Другою проблемою є виявлення і опис зв'язків між цими факторами.

У найпростішому випадку ми можемо назвати лише напрям цього зв'язку – позитивний, коли при збільшенні одного показника значення іншого також збільшується; і негативний – коли при збільшенні одного показника значення іншого зменшується. Часто навіть такі зв'язки складно виявити, оскільки взаємодія і вплив факторів може здійснюватися опосередковано. Більш складною задачею є визначення вагових коефіцієнтів, які описують не тільки напрям, а і силу впливу одного показника на інший.

Розглянемо застосування когнітивного аналізу функціонування еколого-економічної системи на прикладі вертикально-інтегрованої енергетичної компанії.

### **4.3 Побудова когнітивної моделі**

Проведення заходів щодо охорони навколишнього середовища і раціонального використання природних ресурсів є складовою частиною виробничо-господарської діяльності підприємств, що відбивається не тільки в екологічних, але й в економічних результатах [1]. При цьому екологічна система на кожному підприємстві має передбачати природоохоронні заходи, які, з одного боку, зменшують порушення довкілля або запобігають шкідливому впливу забруднення на реципієнтів, з іншого – усувають наслідки забруднення [15]. Системний підхід передбачає врахування як витрат, які виникають при реалізації природоохоронного проєкту, так і вигід, що мають екологічні, економічні і соціальні аспекти [16]. Тому для дослідження виробничо-господарської діяльності компанії як еколого-економічної системи було виділено основні показники (фактори), які будуть вершинами когнітивної карти (КК).

1 – інвестиції у природоохоронну діяльність, млн грн (кошти, які компанія вкладає у реалізацію різноманітних екологічних проєктів, спрямованих на покращення стану навколишнього природного середовища).

2 – чистий грошовий потік, млн грн (він являє собою різницю між грошовими надходженнями компанії та її витратами у розглянутий період часу).

3 – видобуток вугілля, тис. т (обсяг вугілля, видобутого за даний період часу).

4 – вироблення електроенергії, млн кВт\*год (обсяг електроенергії, яка була генерована внаслідок діяльності компанії).

5 – питомі викиди в атмосферу, т/т (цей показник обчислено як відношення загальних викидів в атмосферу до обсягу видобутого вугілля)<sup>1</sup>.

Характеристику викидів в атмосферу було взято саме у такому вигляді, оскільки викиди в навколишнє середовище залежать не лише від застосовуваної технології очищення, але й від обсягів виробництва. Використання питомих викидів в атмосферне повітря дає можливість оцінити саме ефективність екологічної діяльності компанії, позаяк вони відображають скільки тонн викидів приходить на одну тонну видобутого вугілля.

6 – питомі скиди стічних вод, куб. м / кВт\*год (показник демонструє скільки кубічних метрів стічних вод приходить на одну кіловат-годину виробленої енергії).

На першому етапі оцінювання напрямку та наявності зв'язків між виділеними факторами проводилось шляхом опитування експертів. Так було виявлено, що можна прослідити наступні зв'язки:

- зі збільшенням грошового потоку зростає сума, яку компанія може інвестувати в охорону природи (ребро КК 2-1);

- оскільки видобуток вугілля виступає одним з основних чинників формування доходу компанії, то його збільшення призводить до зростання чистого грошового потоку (ребро КК 3-2);

- компанія генерує електроенергію для дистрибуції користувачам, що безпосередньо впливає на грошовий потік компанії (ребро КК 4-2);

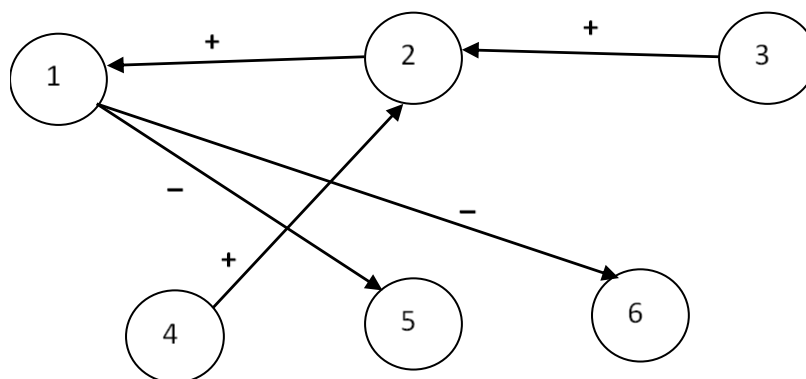
- збільшення інвестицій в охорону навколишнього природного середовища дозволяє запровадити більш дієві заходи, що призводить до зменшення як питомих викидів в атмосферне повітря, так і питомих скидів стічних вод, що описують вплив виробничої діяльності підприємства на стан довкілля (ребра КК 1-5 та 1-6).

---

<sup>1</sup>Ред. Автори взяли для прикладу підприємство вугільної галузі. Показники, які були використані для побудови моделі еколого-економічної системи для такого підприємства, є досить дискусійними. У літературі вчені більше наполягають на зв'язку екологічних показників з показниками техніко-технологічної модернізації (напр., Павличенко А.В. та ін. – Mining of Mineral Deposits, 2021). Тобто поданий матеріал треба сприймати більше як методичний підхід, але для побудови моделі для реального використання треба проводити ретельне дослідження факторів впливу на екологічно відповідальне виробництво у галузі.

На основі вище зазначеного можна побудувати знакову когнітивну карту, яку показано на рис. 4.2. Вона відображає тільки напрямки зв'язків між факторами.

Проте задля вирішення поставленої задачі замало лише наочності зв'язків, необхідно кількісно оцінити взаємовплив факторів. Отже, необхідно визначити ваги ребер когнітивної карти, тобто задати значення, які будуть кількісно відображати ступінь впливу вершин одна на одну.



**Рисунок 4.2** – Когнітивна карта діяльності компанії з урахуванням еколого-економічних аспектів (Джерело: побудоване авторами)

Для цього на основі статистичних даних<sup>2</sup> проведемо регресійний аналіз факторів, які відповідають вершинам КК, використовуючи у даному випадку пакет «Аналіз даних» MS Excel.

Зауважимо, що аналіз проводимо лише для вершин, які пов'язані ребрами у КК. Для таких вершин визначаємо коефіцієнти регресії та перевіряємо їх значущість за критерієм Фішера. Якщо коефіцієнти регресії виявились значущими і логічно відповідають сутності зв'язку між вершинами, то беремо їх за ваги відповідних ребер. Розглянемо цей крок на прикладі зв'язку «Чистий грошовий потік» – «Інвестиції в охорону природи». Користуючись функцією «Регресія» у пакеті MS Excel «Аналіз даних» були отримані результати, які показано на рис. 4.3.

Як бачимо коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,916443712$ , а це означає що розрахункові параметри моделі на 91,64% пояснюють залежність між параметрами, що вивчаються. Коефіцієнт детермінації більший 0,8, що свідчить про високу точність підбору рівняння (коефіцієнту) регресії. Для розглянутої моделі всі коефіцієнти регресії виявились значущими за критерієм Фішера.

<sup>2</sup>Дані взяті з офіційного сайту ДТЕК Енерго – української операційної компанії, яка відповідає за видобуток вугілля і генерацію електроенергії в структурі Групи ДТЕК. Див. – <https://dtek.com>.

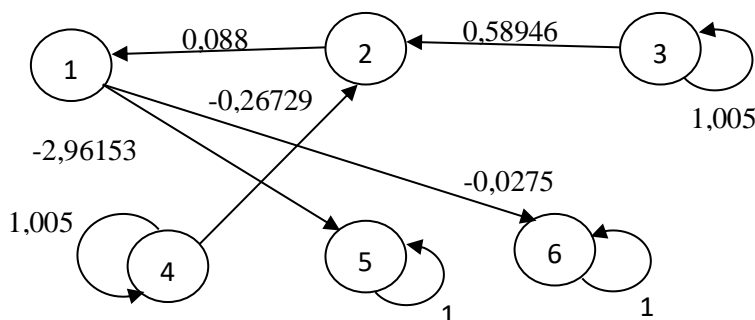


Вывод ИТОГОВ								
<i>Регрессионная статистика</i>								
Множественный R	0,957310667							
R-квадрат	0,916443712							
Нормированный R-квадрат	0,716443712							
Стандартная ошибка	231,7329123							
Наблюдения	6							
<i>Дисперсионный анализ</i>								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>			
Регрессия	1	2944910,517	2944910,517	54,8399012	0,00177388			
Остаток	5	268500,7132	53700,14264					
Итого	6	3213411,23						
	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X1	0,088914442	0,012006709	7,405396762	0,00070672	0,058050214	0,119778669	0,058050214	0,119778669

**Рисунок 4.3** – Приклад регресійного аналізу залежності між факторами «Чистий грошовий потік» та «Інвестиції в охорону природи» (Джерело: розраховане авторами)

Проаналізувавши знак коефіцієнтів регресії та напрям зв'язку в знаковій КК можна дійти висновку, що вони також логічно відображають вплив факторів. Отже, можна прийняти дані коефіцієнти за ваги дуг КК.

В умовах сучасної економічної та політичної нестабільності показники діяльності компанії можуть швидко змінюватися. Припустимо, що кожного року компанія нарощує видобуток вугілля та виробництво електроенергії на 0,5%. Також припустимо, що екологічні показники, які формуються під впливом виробничої діяльності компанії, не змінюються самі по собі, тобто без інвестування в природоохоронну діяльність. Тоді зважена когнітивна карта діяльності компанії з урахуванням еколого-економічних аспектів набуде вигляду, який зображено на рис. 4.4. Тепер можна приступати до розв'язання задач аналізу.



**Рисунок 4.4** – Зважена когнітивна карта діяльності компанії з урахуванням еколого-економічних аспектів (Джерело: побудоване авторами)

#### 4.4 Прогнозування розвитку еколого-економічної системи за допомогою когнітивної моделі

Припустимо, що стан підприємства в кожний момент часу оцінюється набором показників – координат вершин КК, відомо їхні початкові значення. Керівництво компанії зацікавлене в дослідженні сценарію розвитку компанії з метою виявити необхідність застосування спрямованих керувальних дій. Тобто необхідно спрогнозувати основні показники діяльності компанії на 5 років, враховуючи припущення, висунуті при побудові когнітивної карти.

Для розв'язування цієї задачі, скористуємось правилами зміни значень координат когнітивної карти при автономному імпульсному процесі, які описано у роботі [11], а саме:

$$y_i(k + 1) = y_i(k) + \sum_{j=1}^n W_{ij} \Delta y_i(k), \quad (4.1)$$

де  $y_i(k)$  – значення координати  $y_i$  в момент часу  $k$ ,  $W_{ij}$  – вагові коефіцієнти, що описують вплив координати  $y_j$  на  $y_i$ ,  $\Delta y_i(k) = y_i(k) - y_i(k - 1)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  – зміна координати  $y_i$  в момент часу  $k$ .

У векторній формі рівняння (4.1) можна представити таким чином:

$$\Delta \bar{y}(k + 1) = \sum_{j=1}^n W^T \Delta \bar{y}(k), \quad (4.2)$$

де  $W$  – вагова матриця суміжності КК.

Припустимо, задано початкове значення вектору координат вершин КК, а саме:

$$\bar{y}(0) = \begin{pmatrix} 822,5 \\ 5243 \\ 28692 \\ 38284 \\ 0,0269 \\ 23,401 \end{pmatrix}.$$

Матриця суміжності КК (див. рис. 4.4) має такий вигляд:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -0,00003 & -0,03 \\ 0,089 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,59 & 1,005 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,27 & 0 & 1,005 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Використовуючи рівняння (4.2) можна спрогнозувати значення основних показників діяльності компанії на 5 років. Прогнозовані зміни значень показників подано у табл. 4.1.

**Таблиця 4.1** – Прогнозовані зміни показників діяльності компанії протягом 5 років (Джерело: побудоване авторами)

Показник / рік	1	2	3	4	5
Інвестиції в природоохоронну діяльність, млн грн	10	8,891444	26,268755	26,4001	26,5321
Чистий грошовий потік, млн грн	100	295,4386	296,91576	298,4003	299,8923
Видобуток вугілля, тис. т	1000	1005	1010,025	1015,075	1020,151
Вироблення електроенергії, млн кВт*год	1100	1105,5	1111,0275	1116,583	1122,166
Питомі викиди в атмосферу, т / т )	0	- 0,0003	- 0,000559	- 0,00134	- 0,00212
Питомі скиди стічних вод, куб. м /кВт*год	0	- 0,27531	- 0,520092	- 1,24329	- 1,9701

Як можна бачити з табл. 4.1, при стійкому незначному зростанні обсягів виробництва та без керувальних впливів ми маємо наступні результати діяльності компанії через 5 років:

- обсяг інвестицій в охорону довкілля збільшиться в цілому на 98 млн грн;
- грошовий потік в цілому зросте на 1290,6 млн грн;
- видобуток вугілля збільшиться на 5050,3 тис. т;
- обсяг виробленої електроенергії загалом збільшиться на 5555,4 млн кВт\*год;
- відбудеться зниження питомих викидів в атмосферу в цілому на 0,00431 т/т (це зменшення досягається суто за рахунок незначного, проте стабільного, зростання обсягів виробництва та, як наслідок, обсягів інвестування в охорону довкілля);
- зниження питомих скидів стічних вод в цілому на 4,009 куб. м/ кВт\*рік (також досягається без керувальних впливів за рахунок зростання обсягів виробництва та інвестиційних коштів).

Таким чином, можна зробити висновок, що задля отримання позитивної тенденції зниження показників забруднення навколишнього середовища без керувальних впливів достатньо стабільного зростання обсягів виробництва, що дозволить збільшити фінансування заходів в охорону довкілля.

## 4.5 Визначення керувальних впливів для досягнення бажаного стану системи

Однією із особливостей ЕЕС є її стійкість, її функціонування регулюється природою і підтримуються розумною діяльністю людини. У природі діють закони саморегуляції, в економіці це пов'язано з самоорганізацією при активній участі людини. В контексті виконання завдань сталого розвитку це означає підвищення ролі управління у функціонуванні таких систем і приводить до задачі визначення керувальних впливів на систему з метою привести її до бажаного стану, який можна описати у різний спосіб.

Розглянемо два варіанти:

- задано бажані значення параметрів, що описують функціонування системи;
- відомо бажане співвідношення між певними показниками, що описують стан системи.

Таким чином, маємо наступну задачу.

**Задача 1.** Припустимо, що стан системи в кожний момент часу описується певним набором еколого-економічних показників – координат вершин КК, відомо їхні початкові значення та задано певні бажані значення, яких необхідно досягти задля стабільної роботи компанії. Керівництво компанії зацікавлене в підвищенні ефективності виробничо-господарської діяльності та розробці стратегії управління, котра забезпечить досягнення суб'єктом господарювання заданого рівня еколого-економічних показників.

Необхідно визначити оптимальну стратегію управління, яка приведе підприємницьку структуру до бажаного стану.

У формальній постановці це є задачею розробки системи стабілізації нестійкого процесу зміни координат вершин КК на заданих рівнях. Методика розв'язування даної задачі описана в [13]. У роботі [14] виконана розробка моделі керованого імпульсного процесу КК типу «вхід-вихід» з урахуванням зовнішніх керувальних впливів у вигляді (4.3).

$$(I - Aq^{-1})\Delta\bar{y}(k) = Bq^{-1}\Delta\bar{u}(k), \quad (4.3)$$

де  $q^{-1}$  – оператор зворотного здвигу на один період квантування, матриця  $A$  зіставлена з коефіцієнтів КК,  $A = W^T$ .

У модель (4.3) введено вектор приросту зовнішніх керувань:

$$\Delta\bar{u}(k) = \bar{u}(k) - \bar{u}(k-1), \quad (4.4)$$

які впливають безпосередньо на вершини КК та формуються за окремим законом управління. При цьому діагональну матрицю  $B$  можна прийняти одиничною.

Модель КК (4.3) відрізняється відсутністю динамічних зв'язків з управлінням та складною динамікою між координатами (вершинами) КК.

Зауважимо, що у побудованій моделі не можна гарантувати стабільність імпульсного процесу, тому для стабілізації нестійкого перехідного процесу у КК в повних значеннях координат скористаємося запропонованим у роботі [14] методом, який базується на застосуванні еталонної моделі.

Згідно [14] закон управління для задачі стабілізації нестійкого процесу зміни координат вершин КК на заданих рівнях буде отримано у такому вигляді:

$$\bar{u}(k) = (I + A + A_{M1} + (A_{M2} - A)q^{-1})[\bar{G} - \bar{y}(k)], \quad (4.5)$$

при цьому динаміка вершин КК описується таким чином:

$$\bar{y}(k) = -A_{M1}\bar{y}(k-1) - A_{M2}\bar{y}(k-2) + (I + A_{M1} + A_{M2})\bar{G}, \quad (4.6)$$

де  $A_{M1}$ ,  $A_{M2}$  – параметри еталонної моделі,  $G$  – вектор параметрів, що описує заданий стан системи, на рівні складових якого необхідно стабілізувати вершини КК.

Зауважимо, що перехідний процес в керованій КК буде визначатися сформованою динамікою еталонної моделі.

Отже, припустимо, що задано вектор бажаних значень показників (вершин КК):

$$\begin{pmatrix} 1000 \\ 7000 \\ 32996 \\ 44027 \\ 0,026 \\ 21 \end{pmatrix}.$$

Для когнітивної карти описаної вище, в прийнятих позначеннях отримуємо, що:

$$A = W^T,$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0,089 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,59 & -0,27 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,005 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,005 & 0 & 0 \\ -0,00003 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -0,03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

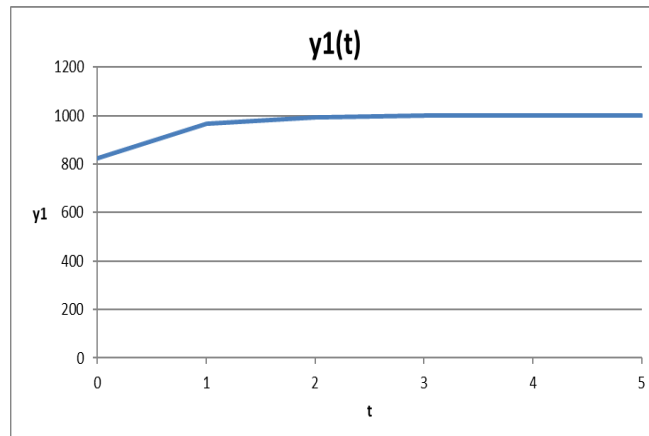
$$B = I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

В якості еталонної моделі замкнутої системи було взято діагональний матричний поліном з однаковими поліномами на головній діагоналі, при цьому значення коефіцієнтів були вибрані такими:  $A_{M1} = -0,3I$ ,  $A_{M2} = 0,02I$ .

Початкові значення координат вершин КК задаємо на таких рівнях.

$$\bar{y}(0) = \begin{pmatrix} 822,5 \\ 5243 \\ 28692 \\ 38284 \\ 0,0269 \\ 23,401 \end{pmatrix}$$

В результаті проведення розрахунків у середовищі MS Excel за формулами (4.5) – (4.6) отримано зміни значень координат КК і необхідні для досягнення бажаних показників керувальні впливи для кожного періоду і координат, які підлягають управлінню. Приклад графіка зміни координати 1 – «Інвестиції в природоохоронну діяльність» показано на рис. 4.5.

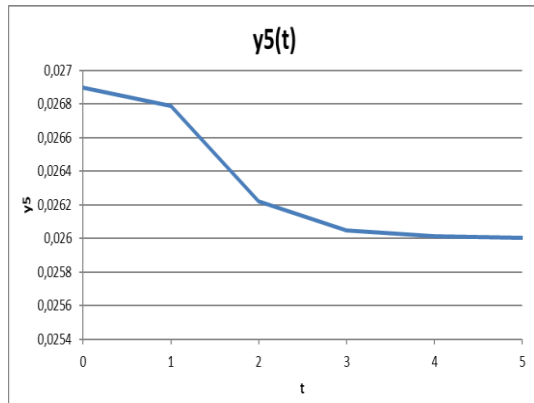


**Рисунок 4.5** – Графік зміни показника «інвестиції в природоохоронну діяльність» (Джерело: побудоване авторами)

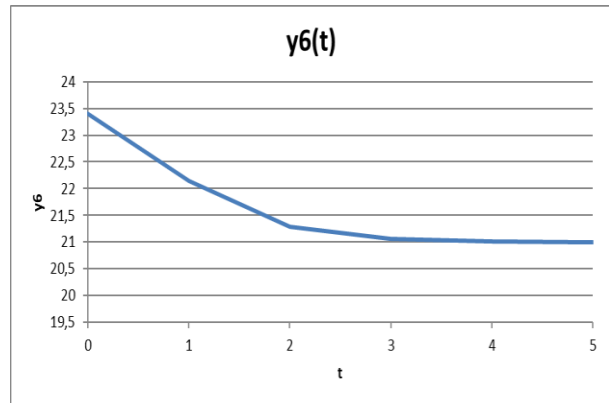
Як бачимо, завдяки управлінню, показник інвестицій в охорону природи досягає бажаних значень (зростає на 177,5 млн. грн.) вже через 2 роки. Згідно з графіком змін координати 5 (див. рис. 4.6) питомі викиди в атмосферу за допомогою управління можна привести до бажаних значень через 4 роки.



Загальне зменшення питомих викидів при цьому становить 0,0009 т/т. Питомі скиди стічних вод вдасться привести до бажаних показників також за 4 роки (рис. 4.7). Значення показника зменшиться на 2,401 куб. м/ кВт\*год.



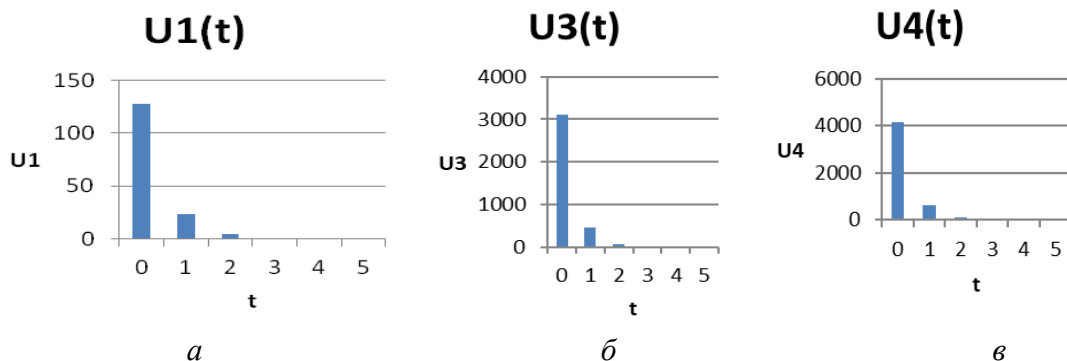
**Рисунок 4.6** – Графік зміни показника питомих викидів в атмосферу, т/т



**Рисунок 4.7** – Графік зміни показника питомих скидів стічних вод, куб. м/кВт\*год

Отже, в результаті розв'язування задачі значення вершин КК, тобто показники діяльності компанії, було стабілізовано на рівні бажаних значень, проте різним показникам потрібен різний час на стабілізацію, але можна з впевненістю стверджувати, що за період у 5 років усі показники стабілізуються на рівні бажаних та похибки управління у всіх вершинах дорівнюють нулю.

Графіки зміни управлінь для вершин 1, 3 і 4 зображено на рис. 4.8.



**Рисунок 4.8** – Графіки отриманих змін керувальних впливів *a* – управління показником «інвестиції в природоохоронну діяльність»; *б* – управління показником «видобуток вугілля»; *в* – управління показником «обсяг виробленої електроенергії»

Як видно з приведених графіків, найбільші значення управління застосовують у перші два роки, а це значить, що саме у ці роки будуть потрібні капітальні інвестиції в діяльність компанії.

**Задача 2.** Розглянемо ситуацію, коли бажаним результатом є не лише фіксування значень показників на певному рівні, а й досягнення встановлених співвідношень між ними. Припустимо, що компанія має на меті зафіксувати обсяг інвестицій в охорону природи на рівні 20% від чистого грошового потоку.

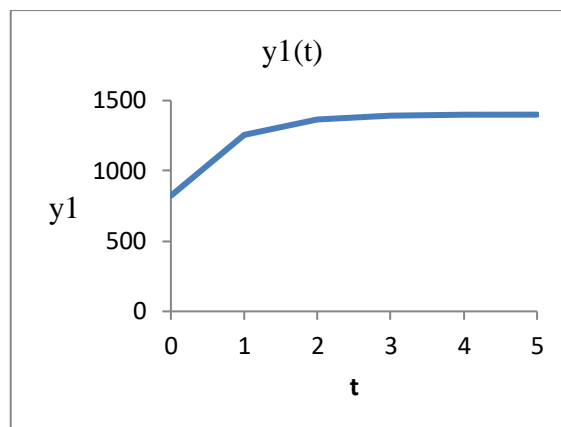
Задане співвідношення можна описати за допомогою такої невиродженої матриці:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

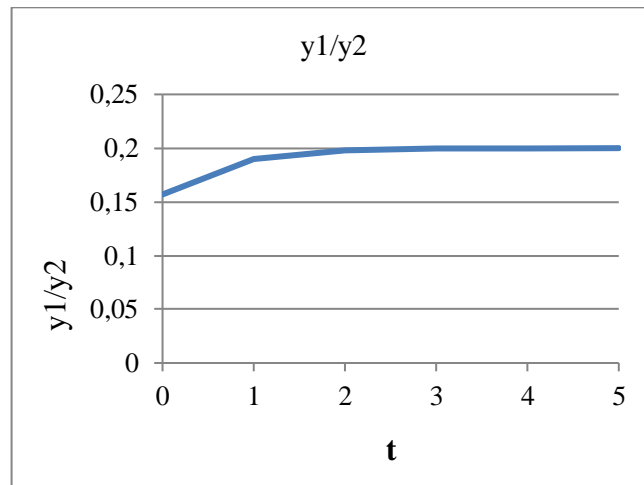
Це дозволяє описати бажаний вектор, який буде задовольняти умовам задачі, у такий спосіб:

$$\bar{G} = R^{-1} \times \bar{b} = \begin{pmatrix} 1 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 7000 \\ 32996 \\ 44027 \\ 0,026 \\ 21 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1400 \\ 7000 \\ 32996 \\ 44027 \\ 0,026 \\ 21 \end{pmatrix}.$$

Далі, застосовуючи підхід, що був описаний вище отримуємо значення для керувальних впливів і зміни значень вершин координат КК. Графік зміни показника «інвестиції в природоохоронну діяльність» показано на рис. 4.9.



**Рисунок 4.9** – Графік зміни показника «інвестиції в природоохоронну діяльність»  
(Джерело: побудоване авторами)



**Рисунок 4.10** – Динаміка зміни співвідношення між інвестиціями в природоохоронну діяльність та чистим грошовим потоком  
(Джерело: побудоване авторами)

Як видно з рис. 4.9, показник «інвестиції в природоохоронну діяльність» досягає бажаного значення вже через 3 роки. Бажане співвідношення між інвестиціями в природоохоронну діяльність та чистим грошовим потоком (вершинами  $Y_1$  та  $Y_2$ ) буде досягнуто приблизно за два роки (див. рис. 4.10).

#### 4.6 Висновки і рекомендації

На підставі проведеного дослідження встановлено, що забезпечення вирішення завдань сталого розвитку компанії, яка в силу технологічних особливостей виробничих процесів суттєво впливає на стан довкілля, потребує аналітичного обґрунтування з використанням математичного інструментарію. Удосконалення методичного підходу до обґрунтування прийняття управлінських рішень щодо функціонування та розвитку підприємницької структури як еколого-економічної системи здійснено шляхом застосування когнітивного аналізу.

Визначено, що підприємницькі структури, які здійснюють виробничо-господарську діяльність, активно використовуючи природні ресурси, являють собою слабо-структуровані системи. Це обумовлено, насамперед тим, що з достатньою повнотою не визначена сама система факторів, що описують функціонування таких систем, і зв'язків між цими факторами. Тому для обґрунтування управлінських рішень доцільно застосовувати когнітивний аналіз, який є орієнтованим саме на дослідження слабо-структурованих систем.

У ході побудови когнітивної моделі було визначено основні фактори, що впливають на природоохоронну діяльність компанії паливно-енергетичного комплексу, а саме: інвестиції у природоохоронну діяльність; чистий грошовий потік; обсяг видобутого вугілля; обсяг електроенергії, що була генерована внаслідок діяльності компанії; питомі викиди в атмосферу та питомі скиди стічних вод.

Дослідження побудованої моделі показало, що за наявності зростання обсягів виробництва маємо тенденції зниження шкідливих викидів в атмосферне повітря і забруднення стічних вод за рахунок сталого зростання інвестицій у природоохоронну діяльність. За умови подання керувальних впливів заданих еколого-економічних показників можна досягти у значно коротший термін (всі результати досягаються за 4 роки, якщо не застосовувати управління – результати не досягаються і протягом 5 років). При цьому основні інвестиції у природоохоронну діяльність компанії потрібно здійснити у початковий період, а саме у перші два роки, далі вони використовуються як корегувальні дії.

Отже, когнітивне моделювання доцільно застосовувати для підвищення обґрунтованості прийняття управлінських рішень при виробленні сценарію досягнення бажаного стану підприємницької структури задля вирішення завдань сталого розвитку з урахуванням певного рівня забезпечення природоохоронної діяльності. Використання когнітивної моделі дає змогу керівникові компанії (структурного підрозділу) системно підійти до розгляду ситуації, виявити зв'язки між окремими факторами та оцінити наслідки прийнятих управлінських рішень. За потреби можна перевірити на моделі декілька альтернативних варіантів для оцінки нових можливостей розвитку системи.

Для більш глибокого аналізу моделі, описаної у вигляді зваженої когнітивної карти, необхідно встановлювати спеціальні припущення про вплив зміни значення однієї вершини на інші. Вибір такого правила суттєво впливає на висновки, які будуть отримані при застосуванні моделі.

Наприклад, якщо припустити, що основні дані (скажімо, початкові значення параметрів і ваги) відомі лише неточно, то остаточні висновки будуть також завжди неточними. Отже, всякий отриманий результат слід розглядати як попередній, що повинен бути підданий додатковому аналізу, а також може включати повторне моделювання та інші правила зміни параметрів

Таким чином, когнітивне моделювання дає можливість розглядати підприємницьку структуру як еколого-економічної систему, що важливо для обґрунтування управлінських рішень у контексті завдань сталого розвитку. Когнітивного аналіз розширює вивчення спектру сценаріїв щодо шляхів досягнення бажаного стану бізнес-системи з урахуванням екологічних та економічних аспектів діяльності та дозволяє отримати відповідний інформаційно-аналітичний матеріал.

## Список використаних джерел

- 1 Баланенко, О. Г. (2017). Сутність та основні завдання еколого-економічного аналізу діяльності підприємства / Баланенко, О. Г., Стойкова, Т. М., Стойкова, І. М. . *Молодий вчений*, №1 (41).
- 2 Дзуліт, З. П. (2018). Економіко-екологічне управління сталим розвитком підприємств залізничного транспорту : дис. ... докт. екон. наук : 08.00.04 «Економіка та управління (за видами економічної діяльності)». Київ.
- 3 Жовновач, Р. І. (2020). Екологічні ризики у формуванні еколого-економічної системи металургійних підприємств. *Державне управління: удосконалення та розвиток*, №5. URL: [http://www.dy.nauka.com.ua/pdf/1\\_2020/5.pdf](http://www.dy.nauka.com.ua/pdf/1_2020/5.pdf).
- 4 Загорський, В. С. (2018). Концептуальні основи формування системи управління сталим розвитком еколого-економічних систем : моногр. Львів : ЛРІДУ НАДУ.
- 5 Колещук, О. Я. (2019). Розвиток інноваційності машинобудівних підприємств на основі когнітивного моделювання: стратегічні сценарії управління. *Проблеми економіки*, №4, 257-263.
- 6 Лебідь, О. Ю. (2018). Побудова когнітивної моделі для аналізу діяльності електронних магазинів. *Ефективна економіка*, №11. URL: <http://www.economy.nauka.com.ua/?op=1&z=4563>.
- 7 Манойленко, О. В., Ягі, М. Когнітивне моделювання забезпечення безпеки національної економіки України. *Причорноморські економічні студії*, (28-1), 188-193.
- 8 Національна доповідь «Цілі сталого розвитку: Україна» (2017). Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf>.
- 9 Палехова, Л. Л. (2020). Управління сталим розвитком: довідник базових понять. Дніпро: НГУ «ДП», (330).
- 10 Прокопенко, О. В. (2008). Екологізація інноваційної діяльності: мотиваційний підхід: моногр. Суми : Університетська книга, (392).
- 11 Робертс, Ф. С. (1986). Дискретні математичні моделі з додатками до соціальних, біологічних та економічних завдань. За ред. А. І. Теймана, (496).
- 12 Розум, Р. І. (2015). Еколого-економічні системи: основні аспекти / Розум, Р. І., Буряк, М. В., Любезна, І. В. *Науковий огляд*, №6 (16), 33-49.
- 13 Романенко, В. Д. (2015). Управление соотношениями координат когнитивной модели сложной системы при неустойчивом импульсном процессе / Романенко, В. Д., Милявский, Ю. Л. *Системні дослідження та інформаційні технології*, №1, 121-129.
- 14 Романенко, В. Д. (2015). Метод адаптивного управления неустойчивыми импульсными процессами в когнитивных картах на основе эталонных моделей / Романенко, В. Д., Милявский, Ю. Л., Реутов, А. А. *Проблеми управління и информатики*, №2, 35-45.
- 15 Тимошенко, Л. В. (2010). Управління витратами екологічної системи при підземному видобуванні рудної сировини / Тимошенко, Л. В., Ус, С. А. *Науковий вісник НГУ*, (7-8), 128-134.
- 16 Тимошенко, Л. В. (2017). Визначення пріоритетності фінансування природоохоронних проєктів сировини / Тимошенко, Л. В., Ус, С. А., Куліченко, Д. В. *Економічний вісник НГУ*, (1), 168-175.
- 17 Шацьк, З. Я. (2018). Сутність дефініції поняття «підприємницька структура» та підходи до її трактування. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Економічні науки*, №6 (129), 111-123.
- 18 Ялдин, І. В. (2011). Когнітивне моделювання у прогнозуванні сценаріїв стратегії стійкого розвитку інтегрованої структури бізнесу. *Проблеми економіки*, №4, 142-150.

## MODELING OF A SUSTAINABLE ECOLOGICAL AND ECONOMIC SYSTEM

**Svitlana Us, Liubov Tymoshenko\***

**Keywords:** ecological and economic system, business structure, sustainable development tasks, system approach, cognitive analysis, management influence.

**The main objective** of this study was to improve the methodological approach to the substantiation of managerial decisions making on the functioning and development business structure as an ecological and economic system based on the development of cognitive modeling to ensure the tasks of sustainable development.

**Methodology.** The results are obtained through the use of cognitive modeling methods – during the study of the processes of influence of business structure economic activity on the environment; multidimensional regression analysis - in determining the coefficients of cognitive model factors influence on target indicators; cognitive analysis and impulse control - when conducting numerical experiments and determining the optimal control strategy to achieve the desired state.

**Findings.** It is established that business structures that carry out production and economic activities and actively use natural resources, are poorly structured systems. The cognitive model of activity of a fuel and energy complex company taking into account ecological and economic aspects is constructed. On the basis of the constructed cognitive model, the forecast of a condition of business structure for 5 years is carried out and the managing influences which provide achievement of desirable ecological and economic indicators of the company activity. It is proved that cognitive modelling should be used to increase the validity of management decisions to achieve the desired state of the business structure, taking into account a certain level of environmental protection.

**Conclusions and Recommendations.** To ensure the tasks of sustainable development, the methodological approach to the substantiation of managerial decisions making on the development of the business structure as an ecological and economic system based on the cognitive modelling has been improved. The use of cognitive analysis to develop a scenario for achieving the desired state of the business system, taking into account the environmental and economic aspects of the activity will provide information and analytical material to increase the validity of management decisions.

---

\***Svitlana Us** – *Cand. Sc. (Physico-mathematical), Associate Professor, Professor of the System Analysis and Control Department, Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: Us.s.a@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0003-0311-9958>.* **Liubov Tymoshenko** – *Cand. Sc. (Economic), Associate Professor, Associate Professor of the Applied Economics, Entrepreneurship and Public Administration Department, Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: Tymoshenko.L.V@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0003-4869-8244>.*



## РОЗДІЛ II

# ЕКОЛОГІЧНІ ТА КЛІМАТИЧНІ ВИКЛИКИ ДЛЯ МЕТАЛУРГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ

Перед Україною постало надскладне завдання – терміново відновити та вивести на європейський рівень підприємства металургії та гірничодобувної промисловості, що отримали значне руйнування через повномасштабну війну РФ проти України. Водночас, враховуючи євроінтеграційні прагнення України, необхідно досягти цілей «зеленого» переходу, тобто забезпечити перехід до бізнес-моделей з більшою ресурсо- та енергоефективністю і прогресивними технологіями з декарбонізації.

«Відбудувати краще ніж було» означає запровадження принципів «зеленого» регулювання та директив ЄС, що стосуються Промислового плану ЄС в рамках Європейської зеленої угоди і сталого розвитку, змінити способи ведення бізнесу, зокрема стимулювати перехід на світові стандарти екологічного менеджменту, циркулярні моделі організації виробництва і споживання, альтернативні джерела енергії тощо. Враховуючи новий європейський механізм транскордонної вуглеводної корекції (СВАМ), українським промисловим експортерам, зокрема гірничо-металургійного комплексу, зрештою доведеться виконувати вимоги декарбонізації і зменшувати свій ресурсний та вуглецевий слід. Водночас багатосторонні рамки та угоди, зокрема Паризької угоди та Цілей сталого розвитку ООН, вимагають процесів справедливої трансформації металургійного комплексу України на принципах екологічної відповідальності та вуглецевої нейтральності.

Мета цього розділу полягає в тому, щоб розширити дискусію стосовно можливостей та необхідностей «зеленого» переходу у процесі відновлення гірничо-металургійного комплексу України, з'ясувати основні проблеми адаптації галузі до нових вимог, спираючись на сучасні дослідження і досвід держав-членів ЄС.

*Глава п'ята* уточнює зміст і принципи формування циркулярної індустріальної системи у промислових ланцюгах створення вартості; вивчає потенціал впровадження технологій циркулярності на українських металургійних підприємствах у контексті завдань Європейської зеленої угоди та інтеграції української промисловості в європейські ланцюги створення вартості. *Глава шоста* досліджує динаміку екологізації металургійного комплексу України та виконує порівняння із загальносвітовими показниками обсягів викидів парникових газів за технологічними виробництвами металургійної промисловості; визначає необхідні заходи під час повоєнного відновлення металургійних підприємств України. *Глава сьома* вивчає ймовірні сценарії технологічної трансформації чорної металургії у світі та в Україні з метою скорочення викидів парникових газів, розглядає можливі методи і технології підвищення енергоефективності з одночасним скороченням викидів CO<sub>2</sub>, аналізує нові можливості та загрози для здійснення справедливого кліматичного переходу в Україні, що формуються внаслідок впровадження Євросоюзом механізму СВАМ.

## ГЛАВА 5

# ДРАЙВЕРИ ТА БАР'ЄРИ ПЕРЕХОДУ МЕТАЛУРГІЇ УКРАЇНИ ДО ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

**Артем Павличенко, Людмила Палєхова\***

**Анотація.** Збереження лінійної моделі виробничих процесів на гірничо-металургійних підприємствах України призводить до масштабних обсягів промислових відходів, що має високий негативний вплив на навколишнє природне середовище та клімат. Дослідження уточнює принципи організації циркулярності в промислових ланцюгах створення вартості і показує існуючі можливості для впровадження циркулярних технологій в контексті повоєнного відновлення металургійної галузі України на принципах Європейської зеленої угоди. Поряд з тим визначаються основні бар'єри для системного впровадження циркулярної економіки, які в першу чергу треба подолати для здійснення «зеленого» переходу у металургійній галузі.

**Ключові слова:** циркулярна економіка, промислові ланцюги створення вартості, «зелений» перехід, металургійна галузь, Україна.

### 5.1 Вступ

Порядок денний зі сталого розвитку до 2030 року визначив циркулярну економіку одним із ключових інструментів для досягнення встановлених глобальних цілей, зокрема Цілі 12 «Відповідальне споживання та виробництво». Парадигма інклюзивної циркулярної економіки стає безумовною основою глобальних програм та ініціатив, що розробляються на рівні ОЕСР, ООН і ЄС. В 2012 році Європейська комісія оголошує «Маніфест для ресурсоефективної Європи» [1], а в 2014 році приймає документ «На шляху до циркулярної економіки: Програма нульових відходів для Європи», в якому зазначається, що циркулярна економіка є моделлю управління ресурсами в рамках Стратегії для розумного, сталого та всеохоплюючого зростання (*англ.* Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth) [2]. У березні 2020 року Єврокомісія ухвалила План дій для досягнення циркулярної економіки (далі – СЕАР) [3], який визначається Новим порядком денним Європи для прискорення «зеленого» переходу і досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року.

---

\***Артем Володимирович Павличенко** – док. техн. наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Перший проректор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна. E-mail: [pavlichenko.a.v@ntnu.one](mailto:pavlichenko.a.v@ntnu.one); <https://orcid.org/0000-0003-4652-9180>.; **Палєхова Людмила Львівна** – канд. екон. наук, доцент, професор кафедри маркетингу, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна. E-mail: [Paliekhova.L.L@ntnu.one](mailto:Paliekhova.L.L@ntnu.one); <https://orcid.org/0000-0003-0217-5755>.

Європейська зелена угода<sup>1</sup> розглядає циркулярність з усіма її синергетичними ефектами, що можуть сильно впливати на можливості пов'язаних виробництв щодо спільного впровадження інноваційних циклічних технологій, запобігання утворенню промислових відходів уздовж ланцюгів створення вартості. Передбачається, що «зелене»-циркулярне виробництво стане нормою на всьому просторі в ЄС, а збільшення рівня переробки і управління відходами з часом призведе до зниження попиту на природну сировину, особливо невідновлювану [3].

В лютому 2021 року відкривається постійний діалог з ЄС щодо приєднання України до Європейської зеленої угоди, у тому числі до СЕАР. Але перехід на принципи циркулярної економіки все ж залишається величезним викликом для української промисловості, що більше 30 років була прив'язана до російського газу, зберігала політику екстенсивного природокористування і покладалася на технології минулого століття, успадкованих ще від Радянського Союзу. Реформи з впровадження європейських директив та правил регулювання, що стосуються промислових викидів та відходів, просуваються дуже важко<sup>2</sup>. У 2022 році за показником «Ресурсоемність та ефективність» Україна посідає 116 місце зі 180 країн<sup>3</sup>. За висновками Промислового діагностичного дослідження ЮНІДО-2024, за показниками вуглецевої ємності Україна з великим розривом відстає від передових країн ЄС та світу [4].

Війна РФ проти України завдала значних збитків промисловості. Особливого руйнування зазнала металургійна галузь, яка завжди вважалася флагманом національної економіки. Після втрати маріупольських меткомбінатів – ММК ім. Ілліча та МК «Азовсталь» – виробництво сталі та прокату скоротилося в 3-3,5 рази<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup>Європейська зелена угода (*англ.* European Green Deal) – дорожня карта Європи, щоб втілити завдання Порядку денного зі сталого розвитку на період до 2030 року і досягти кліматичної нейтральності континенту до 2050 року. Програма дій включає низку стратегій з різними горизонтами планування та оновлення законодавства ЄС, включаючи перегляд діючих європейських директив щодо викидів і відходів. Важливим пріоритетом визначено створення умов для декарбонізації металургії, зокрема плануються заходи з нарощування постачання екологічно чистого водню та енергії з відновлюваних джерел за конкурентними цінами.

<sup>2</sup>Наприклад, законопроект, що імплементує положення Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди, розроблявся з 2019 року, зокрема за технічної допомоги ЄС та Німеччини. Але тільки після 15 років спроб провести реформу контролю за промисловим забрудненням Верховна Рада прийняла Закон України «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення» № 11355 від 19.06.2024 (див.: <https://bit.ly/46mXuQ3>). Цей закон передбачає впровадження системи розширеної відповідальності українського виробника через встановлення чіткого, прозорого та цифровізованого процесу отримання інтегрованого довкілцевого дозволу.

<sup>3</sup>Див.: The Sustainable Competitiveness Report, 11th edition, 2022 – <https://solability.com/solability/sustainability-publications>.

<sup>4</sup>Див.: Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України станом на початок 2024 року – [https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24\\_Damages\\_Report.pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf).

Незважаючи на посилення російської агресії, Національна рада з відновлення України від наслідків війни<sup>5</sup> у 2022 році розробляє проєкт плану повоєнного відновлення України, спираючись на впровадження євроінтеграційних реформ. В свою чергу Європейська Комісія у комюніке COM(2022) 233<sup>6</sup> заявила о готовності допомогти з фінансуванням реформ у форматі стратегічного плану RebuildUkraine Plan, що схвалено Євросоюзом та ключовими партнерами (G7, G20 та ін.) і буде втілюватися українською владою за концепцією «Відбудувати краще, ніж було» (англ. Build Back Better).

Важливою частиною Плану відновлення є «зелена» трансформація промисловості. Планом передбачено повне впровадження положень відповідних директив ЄС, щоб сформувати необхідну нормативну основу для переходу до циркулярних моделей виробництва і споживання, у тому числі в металургійній галузі. Також Україну, зокрема, чекає оновлення Угоди про асоціацію з метою адаптації до цілей СЕАР і внесення нового розділу «Енергія і сировина».

*Аналіз останніх публікацій.* Огляд літератури показав, що тема циркулярної економіки є відносно новою для української наукової спільноти, особливо у контексті завдань кардинальної модернізації і «озеленення» чорної металургії. У цілому автори згодні, що впровадження циркулярної економіки в металургії є передумовою нової промислової революції у післявоєнному розвитку і необхідним кроком для інтеграції нашої держави в Європейський Союз [5]. Вчені [6] показують, що методи циркулярності (реутилізація, ремануфактуринг, рециклінг, екодизайн тощо) формують зовсім нові бізнес-моделі, більш узгоджені з природними системами. В дослідженнях [7] демонструється, що впровадження циркулярних технологій в металургії може надати підприємствам такі важливі для них переваги, як енерго- та ресурсозбереження, скорочення викидів вуглецю, створення нових робочих місць, підвищення іміджу та конкурентоспроможності на глобальних ринках.

Але для України перехід на циклічну узгодженість в промисловості є радикально новою стратегією; є багато проблем, які стримують цей розвиток [8-9]. Інститут економіки промисловості НАН України (О. Амоша та ін. [10]) пропонує концептуальні пропозиції для прискорення озеленення вітчизняної промисловості, зокрема металургії, у повоєнному відновленні. Результати досліджень [11] проказують, що не виконана робота з розроблення цілої низки підзаконних нормативно-правових актів у галузі управління відходами, необхідних для реалізації циркулярних перетворень.

---

<sup>5</sup>Національна рада з відновлення України від наслідків війни була створена Указом Президента від 21 квітня 2022 року № 266/2022, є консультативно-дорадчим органом при Президентові України.

<sup>6</sup>Див.: Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions «Ukraine Relief and Reconstruction» – <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0233>.

*Метою дослідження є з'ясування проблем та принципів впровадження циркулярних моделей в українській металургії у контексті формування «зеленого» переходу у виробничих ланцюгах створення вартості. Задачами дослідження визначені наступні: 1) уточнити розуміння циркулярності у промислових ланцюгах створення вартості; 2) довести існуючий потенціал розширення циркулярності на українських металургійних підприємствах, що є необхідним для повоєнного відновлення України та інтеграції в європейські ланцюги створення вартості.*

*Методика дослідження спирається на дві вихідні позиції: по-перше, базові положення циркулярних моделей розуміються та інтерпретуються у контексті завдань Європейського зеленого курсу; по-друге, циркулярність приймається безумовною необхідністю екологізації виробничих ланцюгів створення вартості у цілому.*

## **5.2 Основні положення циркулярної економіки в металургії**

В науковій літературі концепція циркулярної економіки (або економіки замкнутого циклу) формулює нове бачення управління виробничими ресурсами, що змінюють класичну лінійну (розподільчу) практику виробництва [5-6; 12-14]. Лінійна модель має чіткий вхід і вихід з виробничої системи – «взяти-використати-спожити-викинути», тобто є надходження сировини і матеріалів, їх переробка в процесі виробництва, а потім відходи викидаються в оточуюче середовище. Ресурси, що були використані, вже не представляють будь-якого комерційного інтересу для виробників по всьому ланцюгу створення вартості. Ключова ідея циркулярної економіки полягає у тому, що продукти проєктуються, виробляються та просуваються таким чином, щоб ресурси можна було використовувати багаторазово, зводячи до мінімуму відходи [14].

У 2013 році Фонд Ellen MacArthur публікує свій знаменитий аналітичний огляд «Вперед до циркулярної економіки», в якому пропонує структурну модель циклічної економіки – «метелик», що є дуже популярною у науковій літературі [15]. На рис. 5.1 пояснюється зміст базових принципів циркулярної індустріальної системи, а саме: 1) збереження і покращення природного капіталу; 2) оптимізація використання ресурсів і матеріалів; 3) мінімізація впливу і підвищення ефективності споживання.

Комюніке Єврокомісії і Європарламенту «Назустріч циркулярній економіці: програма без відходів для Європи» від 2014 року [16] розкриває такі завдання циркулярної індустріальної системи: 1) максимізація повторного використання сировини і матеріалів; 2) запобігання та мінімізація утворення відходів; 3) підвищення енергоефективності і перехід на відновлювані джерела енергії; 4) перехід до технологій, що зменшують споживання природних ресурсів та викопного палива; 5) розширення «функціонального обслуговування», що сприяє збільшенню терміну життя кінцевого продукту у ланцюгу створення вартості; 6) залучення до процесу циркулярності усіх учасників ланцюгів створення вартості.



**Рисунок 5.1** – Принципи формування циркулярної індустріальної системи (Джерело: застосована модель циркулярності Фонда Ellen MacArthur [15])

Новий план дій ЄС з циркулярної економіки (CEAP) [3] деталізував основні напрями політичної уваги, зокрема: (1) *виробничі процеси* – технології раціонального використання ресурсів та переробки відходів протягом усього життя продукту; (2) *споживання* – підтримка повторного використання матеріалів і продуктів; 3) *ланцюги створення вартості* – дії у секторах з особливими проблемами через специфіку їх впливу на навколишнє середовище та екологічну сталість пов'язаних виробництв, зокрема у металургії; (4) *повторне використання* – дії з розвитку ринку вторинної сировини; (5) *поводження з відходами* – стимулювання зменшення утворення відходів та сприяння переробці відходів; (6) *інновації та інвестиції* – системні горизонтальні заходи для створення циркулярної економіки; (7) *моніторинг* – аналіз показників циркулярності на кожному етапі створення вартості у різних часових горизонтах.



Виходячи з вимог концепції СЕАР, металургійне підприємство, що переходить на циркулярну модель, дотримується наступних основних підходів: 1) пропонує циркулярні продукти – «дизайн без відходів», що враховує можливість ремонту, відновлення та повторного використання після закінчення терміну служби продукту; 2) здійснює розмежування матеріальних потоків за типом їх циркулярності – «сегментацію матеріалів і складових» з метою можливості їх повторного використання або безпечного повернення в біосферу; 3) знижує залежність від змін вартості енергетичних ресурсів – впроваджує сучасні стандарти енергоменеджменту та, за можливістю, переходить на «чисту» енергію з відновлюваних джерел.

При цьому вчені застерігають від спрощених ресурсо-центричних політик, коли окремі заходи боротьби з відходами підміняють більш складний багатовекторний процес циркулярності. Кінцевою метою циркулярності є зменшення матеріального і вуглецевого сліду галузі у цілому, тобто циркулярність потребує технологічної збалансованості пов'язаних виробництв, починаючи з процесів видобування руди, і одночасного переходу на відповідальні моделі споживання і виробництва [17-18].

Відповідальність у гірничо-металургійній галузі означає зміну філософії готової продукції та відходів, стратегічного бачення їх готовності повертатися у процес вторинного видобутку і ставати сировиною для подальшої переробки, де буде вироблятися той самий або інший вид товарної продукції [18]. Але необхідні новітні технології можуть стати неможливими через невідповідність технічного стану засобів виробництва, брак коштів на впровадження проєктів, відсутність необхідної інфраструктури, неадекватність менеджменту і логістики тощо [21].

Перехід до циркулярності в металургійному комплексі вимагає від підприємства адаптивного менеджменту, метою якого є безперервна еволюція управління підприємством, спираючись на нові знання та досвід у галузі<sup>7</sup>. Адаптивний менеджмент має узгоджувати програми розвитку підприємства із завданням «втягування» в модель циркулярності інших зацікавлених учасників процесу – постачальників, покупців, інвесторів та ін. [22-23]. Тобто відповідальне металургійне підприємство має не тільки оптимізувати використання ресурсів у своєму виробництві, але й сприяти своїми програмами та продуктами розвитку циркулярності уздовж гірничо-металургійного виробничого ланцюгу – від видобутку руди, їх збагачення, до виплавляння металу і виробництва прокату [24-25].

---

<sup>7</sup>Адаптивний менеджмент (*англ.* adaptive management, AM) – це гнучке управління, що здійснюється при наявності значних невизначеностей або мінливостей у зовнішньому середовищі. Стандарт США ADS 201 (для розробки оперативної політики) визначає адаптивний менеджмент як «структурований ітеративний підхід до корекції прийнятих рішень у відповідь на нову інформацію і зміни в контексті» [14]. Адаптивне управління полягає не в зміні цілей, а в зміні шляхів чи методів їх реалізації, тобто «навчання через відповіді практики» [22].

Також зазначимо, що масштабна «зелена» трансформація металургії і розширення циркулярності будуються на інноваціях Індустрії 4.0. Так, Markus A. Reuter [19], Enrico Cagno [20] та інші вчені<sup>8</sup> наполягають, що використання сучасних цифрових інструментів (штучний інтелект, хмарні обчислення, аналітика великих даних, блокчейн, віртуальна реальність, т.д.) відкриває для металургійної промисловості нові можливості для вимірювання і моніторингу процесів і характеристик продуктів, пошуку спільних вигід через циркулярність та сталий розвиток (див. рис. 5.2).



**Складові управління циркулярними процесами в ланцюгах створення вартості**

- ✓ Горизонтальна і вертикальна інтеграція
- ✓ Консолідована аналітична обробка даних
- ✓ Моделювання виробничих та бізнес процесів
- ✓ Цифрові екосистеми управління

**Рисунок 5.2** – Система управління циркулярним розвитком в металургічних ланцюгах створення вартості (Джерело: розроблено на основі [19])

<sup>8</sup>Див., наприклад: Onifade, M., Adebisi, J. A., Shivute, A. P., & Genc, B. (2023). Challenges and applications of digital technology in the mineral industry. Resources Policy, 85, 103978. 0/; Gajdzik, B., & Wolniak, R. (2021). Digitalisation and innovation in the steel industry in Poland – Selected tools of ICT in an analysis of statistical data and a case study. Energies, 14(11), 3034; Miśkiewicz, R., & Wolniak, R. (2020). Practical application of the Industry 4.0 concept in a steel company. Sustainability, 12(14), 5776.

Зазначимо також, що впровадження металургійними підприємствами технологій циркулярної економіки не тільки максимізують ефективність виробництва і сприяють «зеленому» переходу галузі, але й прямо чи опосередковано підтримують виконання задач усіх глобальних цілей сталого розвитку (див. табл. 5.1).

**Таблиця 5.1** – Вплив впровадження циркулярності у металургійній галузі на показники сталого розвитку\* (Джерело: побудовано авторами)

Цілі / ефекти	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Технологічні індикатори</i>																	
Ресурсоемність									+		+	+				+	
Енергоемність							+		+			+	+				
Викиди вуглецю			+				+		+		+	+	+				
Споживання води						+			+		+	+					
<i>Сфери впливу на сталий розвиток</i>																	
Економіка		+						+	+	+	+	+					+
Соціум	+	+	+	+	+												
Екологія			+			+					+	+		+	+		
Глобалізація				+			+	+				+	+	+	+	+	+
<i>Індикатори якості життя</i>																	
Бідність	+							+									
Здоров'я		+	+														
Освіта				+													
Санітарія						+											
Харчування														+	+		
Зміна клімату							+							+	+		
Інфраструктура								+	+		+		+				
Забруднення			+			+			+		+	+		+	+		
Гідна праця				+	+			+		+							
Гарне місто	+					+		+	+	+	+						
<i>Всього</i>	3	3	5	4	2	5	4	6	8	3	8	8	4	5	6	1	2

\*Для аналізу були взяті класифікації ефектів сталого розвитку, що використовуються в офіційних глобальних звітах організації ООН (більш детально див. [14]). Вихідні дані взяті зі звітів сталого розвитку металургійних підприємств міжнародної корпорації ArcelorMittal [26-27].

Як бачимо, ефекти впровадження циркулярності в металургії впливають на усі складові завдання глобальних цілей сталого розвитку, зокрема на такі індикатори: ЦСР 7 (7.3.1 «Енергоемність ...»); ЦСР 9 (9.2.1 «Додана вартість, створювана в обробній промисловості ...»; 9.4.1 «Викиди CO<sub>2</sub> на одиницю доданої вартості»); ЦСР11 (11.6.2 «Середньорічний рівень утримання дрібних твердих частинок ... в атмосфері міст...»); ЦСР 8 + ЦСР 12 (8.4.1/12.2.1 «Сукупні ресурсовитрати ...»; 8.4.2/12.2.2 «Внутрішнє споживання матеріалів...», 12.4.2 «Небезпечні відходи ... », 12.5.1 «Національний рівень переробки відходів»); ЦСР 13 (13.2.2 «Сукупний річний обсяг викидів парникових газів») та ін.

### **5.3 Потенціал впровадження циркулярних моделей в українській металургії**

Економіка України завжди була зосереджена на видобутку первинних ресурсів (мінералів і металів) та металургійній промисловості. Так, у світовому рейтингу WorldSteelAssociation 2020 року Україна посідала 7 місце з видобутку залізної руди та 11 місце серед виробників сталі<sup>9</sup>. Найбільш потужним є Криворізький район, у якому видобувається майже вся українська руда і виплавляється майже половина металу.

Великі обсяги виробництва і споживання разом із застарілою технічною базою обумовили у регіоні високі показники щорічного утворення і нагромадження відходів, зокрема під час видобутку і збагачення залізної руди, металургійного, феросплавного, коксохімічного, гальванічного і травильного виробництв. В екологічному звіті Дніпропетровської області за 2021 рік<sup>10</sup> вказується, що у складі викинутих за рік забруднюючих речовин в атмосферу надійшло 20,5 млн т діоксиду вуглецю – основного парникового газу, який впливає на зміну клімату. У загальному обсязі утворених відходів 25,9 тис. т становлять відходи I-III класів небезпеки.

До війни лише деякі українські металурги встигли зробити кроки на шляху до циркулярності [28]. Унікальне за своїми масштабами підприємство «АрселорМіттал Кривий Ріг» було одним з таких. Але найпотужніший гравець на світовому ринку металу і флагман з цифрових технологій у металургії виступає одним з найбільших забруднювачів навколишнього природного середовища в регіоні. Наприклад, за 2022 рік підприємство утворило 88,5% загального обсягу викидів у повітря Кривого Рогу.

На момент написання цієї монографії пройшло більше, ніж два роки з початку повномасштабного вторгнення РФ в Україну. Внаслідок бойових дій агресора українська металургія понесла великі збитки. Зокрема, повністю зруйновано три підприємства-гіганти металургії – ПрАТ «Металургійний комбінат Азовсталь, ПрАТ ММК ім. Ілліча – в Маріуполі, а також ПАТ «Авдіївський коксохімічний завод»; пошкоджено Миколаївський глиноземний завод та ПРАТ «Дніпроспецсталь» [13]. До того ж агресор захоплює вантажні кораблі з металевою продукцією. Наприклад, ГМГ «Метінвест» повідомив про спроби окупантів вивезти з її заводів в Маріуполі 200 тис. т готової металевої продукції вартістю \$170 млн<sup>11</sup>.

---

<sup>9</sup>Див.: Звіт Всесвітньої організації виробників сталі (WorldSteelAssociation-2020) – <https://worldsteel.org/media/press-releases/2020/june-2020-crude-steel-production/>.

<sup>10</sup>Див.: Екологічний паспорт Дніпропетровської області за 2021 рік (2022) – <https://adm.dp.gov.ua/storage/app/media/Pro%20oblast/EkoloHiia/Rehionalna%20dopovid%20ta%20Ekolohichni%20pasport/2021.pdf>

<sup>11</sup>Див.: Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України станом на початок 2024 року – [https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24\\_Damages\\_Report.pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf).

Для збереження ділової активності українським металургам доводиться долати величезні труднощі. Ворожі обстріли та системні руйнування промислових об'єктів, перебої із постачанням сировини та енергоресурсів, атаки на залізничну інфраструктуру і блокування морських портів разом призвело до 70% скорочень обсягів металургійного виробництва. Так, у 2022 році «АрселорМіттал Кривий Ріг» використовує лише 25% своїх потужностей<sup>12</sup>. Логістичні обмеження та інші бар'єри викликали проблеми збуту. Навіть при скасуванні мита на деяких ключових зовнішніх ринках потрібні зусилля для пошуку іноземних партнерів.

Але саме зараз українська металургія перебуває на порозі переходу на циркулярне виробництво «зеленої» сталі. RebuildUkrainePlan розглядає циркулярність як спосіб заснування екологічно чистого виробництва на сучасних підприємствах з новітніми технологіями. Циркулярні цілі СЕАР передбачають насамперед впровадження процесів і методів обробки, що відновлюють цінність промислових відходів, зокрема для внутрішнього використання або для експорту.

22 червня 2023 року на Ukraine Recovery Conference (URC 2023), яку провела Велика Британія спільно з Україною в Лондоні<sup>13</sup>, відбулося підписання меморандуму про партнерство щодо «зеленого» відновлення металургійного сектору України. Разом із українською ГМГ «Метінвест»<sup>14</sup> угоду підписали західні компанії Primetals (Австрія), Fortescue – FMG (Австралія), Rothschild & Co (Франція) та інші потенційні споживачі української сталевого прокату та сировини. Створена коаліція об'єднує металургів, виробників обладнання, фінансові установи, урядові організації та інші зацікавлені сторони. Очікується, що «зелена» металургія України стане рушійною силою для підтримки програми декарбонізації ЄС.

Держави-члени ЄС навіть у рамках спільної промислової політики можуть мати національні особливості у фокусах уваги по секторах економіки та розробляти власні програмні завдання у впровадженні циркулярності. Для України «зелена» металургія починається з безвідходних технологій переробки руд чорних металів, що охоплює весь виробничий ланцюг – від розробки родовищ до використання готової продукції.

---

<sup>12</sup>У 2024 році підприємство «АрселорМіттал Кривий Ріг» відновило свої потужності до 50% (за даними Gmk Center – <https://gmk.center/ua/>).

<sup>13</sup>Ukraine Recovery Conference (URC 2023) стала третім від початку війни масштабним міжнародним заходом, присвяченим повоєнному відновленню України, після конференцій у Лугано і Римі. Конференцію відкривав прем'єр-міністр Великої Британії Ріші Сунак і президент України Володимир Зеленський (див.: Ukraine Recovery Conference, 21-22 June 2023 – London, UK <https://www.urb-international.com/urb-2023>).

<sup>14</sup>ГМГ «Метінвест» – вертикально інтегрована гірничо-металургійна група компаній, до якої входять видобувні та металургійні підприємства України, Європи та США, а також торговельна мережа по всьому світу. Метінвест має всі етапи гірничо-металургійного ланцюгу: від видобутку сировини, виробництва металопрокату, постачання та продажу готової продукції. Група є найбільшим генератором металургійних відходів в Україні.



Майже всі українські металургійні компанії мають повний виробничий цикл від видобування руди до виробництва прокату [29-30]. На рис. 5.3 показано, що на кожному етапі виробничого ланцюга компанії утворюють відходи або побічні (зворотні) продукти, що можуть стати вторинною сировиною для виробництва чавуну, сталі для власного виробництва або для інших галузей – це шлак, шлаки, металобрухт та інші відходи, що містять чорні метали, а також нерудна мінеральна сировина.

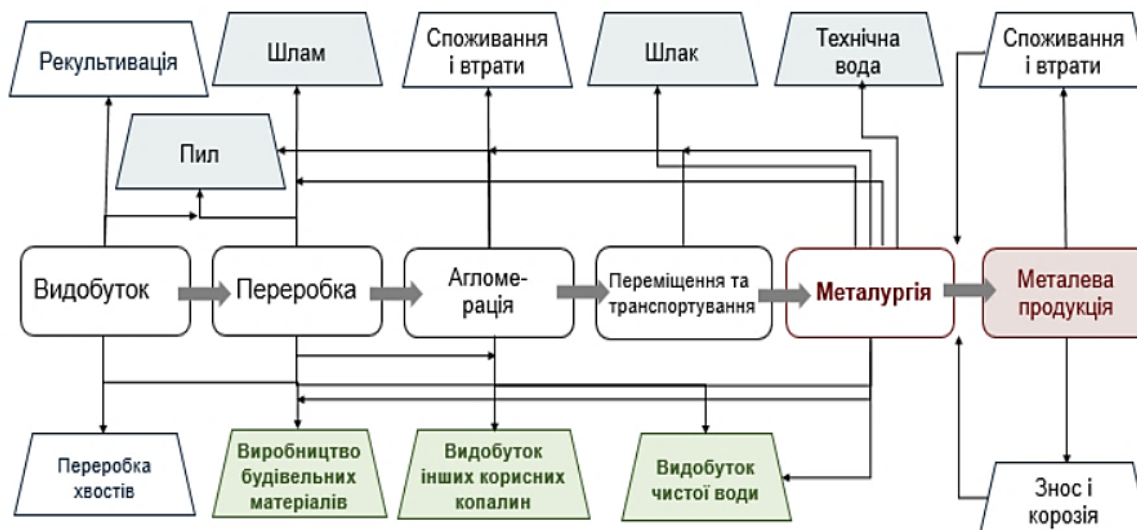


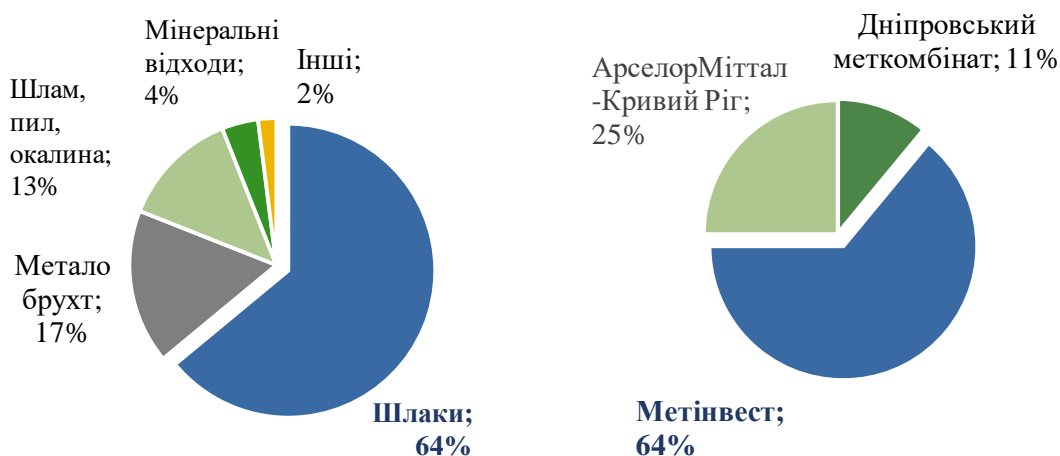
Рисунок 5.3 – Промислові відходи у гірничо-металургійних ланцюгах України (Джерело: використано [30])

З точки зору завдань розвитку циркулярності в Україні великий інтерес існує до металургійних шлаків, які за різними оцінками складають десь 64% всіх відходів українських металургійних підприємств (див. рис. 5.4). За даними досліджень українських вчених [31], на металургійних підприємствах України сьогодні накопичено 240 млн т шлаків. При відкритому способі складування відвали шлаків впливають на всі складові навколишнього природного середовища: є джерелом забруднення атмосфери через емісію поллютантів у повітря, забруднюють ґрунти та водні екосистеми, руйнують ландшафти, впливають на клімат та здоров'я людей; до того ж складування шлаків забирає великі площі цінної землі.

Огляд аналітичних публікацій показує, що використання металургійних відходів в Україні зростає. Є велика кількість досліджень, що вивчають проблему розширення переробки шлаку як сировини [29-31]. Насамперед, зазначимо, що металургійний шлак містить велику кількість цінних металевих елементів, тобто можлива глибока переробка відходів доменного, агломераційного і сталеплавильного виробництв з подальшим вилученням кондиційного залізного концентрату, придатного для завантаження доменних печей і отримання мінеральної сировини для будівництва<sup>15</sup>.

<sup>15</sup>Ред. Див. більше у главі 7.





**Рисунок 5.4** – Розподіл металургійних відходів по видам та основним підприємствам-забруднювачам в Україні (Джерело: [31])

Наприклад, в НТУ «Дніпровська політехніка» розроблено загальну гравітаційно-магнітну схему установки для переробки агломераційних, доменних і сталеплавильних шлаків [30], що дозволяє додатково добувати залізо з вмістом 56-62% і виходом додаткової готової продукції до 25-45% в залежності від зони видобутку. Також є ще галузі, де утилізація шлаків відіграє усталену роль, зокрема дорожнє будівництво та експлуатація доріг. Переваги шлаку як будівельного матеріалу (низька ціна і міцність) довів проєкт компанії «Автомагістраль-Південь», що використовувала шлак при будівництві нової дороги Н-31 «Дніпро-Решетилівка»<sup>16</sup>. І все ж Україна відстає від країн ЄС та деяких інших країн світу у питаннях переробки металургійних відходів.

Є дуже багато західних публікацій, що доводять можливості розширити використання металургійних шлаків у будівництві. Зокрема, металургійні шлаки можна розглядати як основну сировину для виготовлення склокераміки CMAS, що стійка до корозії та має більшу механічну міцність, ніж інші будівельні матеріали [32]. Також пропонується використання металургійних шлаків в якості сорбентів для очищення стічних вод від забруднюючих речовин або в технологічних циклах [33]. Враховуючи, що проблема забруднення води в даний час стає все більш актуальною для України, цей напрямок використання шлаку здається дуже перспективним.

Таким чином, навіть стислий огляд літератури виявив велику кількість пропозицій з використання металургійних відходів, що можуть бути цікавими для розробки циркулярних моделей в Україні, зокрема шлаки можуть широко використовуватися як сировина в цивільному будівництві або в екологічних цілях.

<sup>16</sup>Див.: <https://mcet.com.ua/metallurgijni-shlaki-u-dorozhnomu-budivnitstvi-pobichnij-ale-ne-drugoryadnij-produkt/>.

Головним бар'єром переходу української промислової сфери до циркулярності, на наш погляд, є відсутність національної програми дій і адекватних законодавчих актів, що спонукають, зокрема галузь корисних копалин та металургію, до застосування циркулярних технологій. Наприклад, Швеція, Данія, Фінляндія та Німеччина, що є лідерами в досягненнях циркулярності, мають державну цільову програму дій з просування циркулярної економіки. У Німеччині діє Закон про економіку замкнутого циклу [34], Фінляндія стала першою країною в світі, яка розробила національну дорожню карту для переходу до циркулярної економіки [35].

В Україні 9 липня 2023 року набув чинності довгоочікуваний рамковий Закон України «Про управління відходами», що запускає реформу системи управління відходами. Але, очевидно, що циркулярна економіка в металургії запрацює лише тоді, коли ще буде розроблена необхідна інфраструктура та логістика, механізми розвитку ринків вторинної сировини, модель сприяння інвестуванню у циркулярні технології і стимулювання рециклінгу у промисловому виробництві тощо.

#### **5.4 Висновки і рекомендації**

Дослідження довело, що українська металургія має сильну внутрішню мотивацію, достатній потенціал і велику зовнішню підтримку з боку ЄС в рамках RebuildUkraine Plan для здійснення «зеленого» переходу. Але великим бар'єром для системного впровадження циркулярності у металургійній галузі є відсутність наскрізних дій на державному рівні, враховуючи завдання відновлення промисловості на принципах Плану дій для досягнення циркулярної економіки в ЄС (CEAP).

Вважаємо, що у випадку України є необхідність прийняття окремого закону як базового нормативно-правового акту, що дозволить комплексно регулювати правові відносини у сфері розвитку циркулярності, особливо в промисловому виробництві, зокрема має визначити порядок планування і стимулювання розвитку циркулярності; запустити механізми вимірювання і моніторингу циркулярності на основі введення у статистичну звітність промислових підприємств показників циркулярності виробництва.

Враховуючи досвід провідних європейських держав, у металургійній галузі буде доцільно впровадити такі кроки: 1) створити галузевий координаційний центр для організації вивчення найкращого світового досвіду і просування інноваційних циркулярних технологій у металургії; 2) запустити щорічний вузькопрофільний форум «Циркулярний розвиток металургії України» за участю представників уряду, металургійних підприємств, потенційних інвесторів та інших зацікавлених осіб для обговорення спільних циркулярних проєктів та інших можливих ініціатив; 3) ініціювати адаптацію освітньо-професійних програм підготовки здобувачів вищої освіти, особливо за профільними видами майбутньої професійної діяльності, з метою забезпечення базовими знаннями з питань циркулярної економіки.

## **Список використаних джерел**

- 1 Manifesto for Resource-Efficient Europe (2012). Adopted in Brussels, 17 December 2012 by European Commission. *European Resource Efficiency Platform (EREP)*. URL: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-12-989\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-12-989_en.htm).
- 2 Europe 2020: A Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A52010DC2020>.
- 3 A new Circular Economy Action Plan «For a Cleaner and more Competitive Europe». Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM/2020/98 final. Brussels, 11.3.2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>.
- 4 Ukraine industrial country diagnostics 2023. UNIDO 2024. URL: [https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2024-02/Industrial%20diagnostic%20study\\_2023\\_0.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2024-02/Industrial%20diagnostic%20study_2023_0.pdf).
- 5 Matukhno, E., Belokon, K., Shatokha, V., & Baranova, T. (2019). Ecological aspects of sustainable development of metallurgical complex in Ukraine. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(4), 671-679.
- 6 Єфанов, В. (2024). Використання принципів циркулярної економіки та замкнутих циклів у виробництві для мінімізації відходів та зменшення навантаження на навколишнє середовище. *Економіка та суспільство*, (62). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-62-95>.
- 7 Сталінська, О. В., Драчук, Ю. З., Снітко, Є. О. (2019). Щодо напрямів формування стратегії використання відходів металургійного виробництва, залучення їх у вторинне виробництво. *Управління розвитком підприємств в умовах динамічної ринкової кон'юнктури: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (27 грудня 2019 р.; м. Київ)*, 243-246.
- 8 Palekhov, D., Palekhova, L. (2021). Environmental sustainability in achieving the sustainable production and consumption: challenges of a Post-Soviet transition economy. *Transposition of the Acquis Communautaire – Migration and Environment*. Umweltrecht in Forschung und Praxis 66. Verlag Dr. Kovač, Hamburg, 60-87.
- 9 Pavlychenko, A., Paliekhova, L. (2024). Achieving environmental sustainability in industrial value chains. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: A. Pavlychenko, L. Paliekhova. Dresden, 15-21.
- 10 Амоша, О. І. та ін. (2023). Деякі концептуальні пропозиції Інституту економіки промисловості НАН України щодо підтримки та розвитку вітчизняної промисловості під час воєнного стану та повоєнної неіндустріальної модернізації. *Вісник економічної науки України*.
- 11 Руда, М. В., Яремчук, Т. С., & Бортнікова, М. Г. (2021). Циркулярна економіка в Україні: адаптація європейського досвіду. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*, 3(1), 212-222.
- 12 Kirchherr, J., et al. (2023). Conceptualizing the circular economy (revisited): an analysis of 221 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 107001.
- 13 Дзуліт, З., Андрусак, К. (2023). Виклики металургійної галузі України в умовах сьогодення. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*. Львівська політехніка, (5), 261-269.
- 14 Палехова, Л. Л. (2020). Управління сталим розвитком: довідник базових понять. *Дніпро: НТУ «Дніпровська Політехніка»*, (330).
- 15 Towards the Circular Economy. Economic and business rationale for an accelerated transition. Ellen MacArthur Foundation. URL: <https://www.aquafil.com/assets/uploads/ellen-macarthur-foundation.pdf>.
- 16 Towards the Circular Economy: A Zero Waste Programme for Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 2.7.2014. URI: <https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0001.01/>.

17 Palekhov, D., Palekhova, L. (2019). Responsible Mining: Challenges, Perspectives and Approaches. *Sustainable Global Value Chains*. Published by Springer, 521-544.

18 Paliekhova, L. (2024). Circular economy: measuring the material footprint *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: A. Pavlychenko, L. Paliekhova. Dresden, 43-54.

19 Reuter, M. A., van Schaik, A., Gutzmer, J., Bartie, N., & Abadías-Llamas, A. (2019). Challenges of the circular economy: a material, metallurgical, and product design perspective. *Annual Review of Materials Research*, 49(1), 253-274. DOC\_1&format=PDF.

20 Cagno, E., Neri, A., Negri, M., Bassani, C. A., & Lampertico, T. (2021). The role of digital technologies in operationalizing the circular economy transition: A systematic literature review. *Applied Sciences*, 11(8), 3328.

21 Ingaldi, M., & Ulewicz, R. (2024). The business model of a circular economy in the innovation and improvement of metal processing. *Sustainability*, 16(13), 5513.

22 Швець, В. Я., Палехова, Л. Л., Палехов, Д. (2019). Адаптивний менеджмент для цілей циркулярної економіки. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування: зб. наук. праць ДВНЗ «Піднепр. держ. академія буд-ва і архітектури»*. Дніпро, 207-212.

23 Tryfonova, O., Paliekhova, L. (2021). Enabling sustainable management for industrial enterprises. *Sustainability in the industrial sector: Proceedings of the Study Seminar at NTU Dnipro Polytechnic - BTU Cottbus-Senftenberg, 24th Dec. 2020 -18th Jan. 2021*. Ed.: Shvets V., Paliekhova L. Dnipro-Cottbus, 97-102.

24 Палехова, Л. Л. (2016). Проблема інтеграції у глобальні ланцюги створення вартості. *Управління сталім розвитком в умовах перехідної економіки: монографія*. Дніпропетровськ-Коттбус: НГУ-БТУ, 315-324.

25 Palekhov, D., Paliekhova, L. (2022). Vulnerability of global supply chains: Lessons from the COVID-19 pandemic. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: Shvets V., Paliekhova L. Dnipro-Cottbus, 36-40.

26 ArcelorMittal Luxembourg (2020): Sustainable development report. URL: <http://luxembourg.arcelormittal.com>.

27 Fărcean, I., Proștean, G., & Socalici, A. (2023). Sustainable development indicators in the steel industry. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2540, No. 1, 012045. IOP Publishing.

28 Антонік, І. П. та ін. (2020). Кривбас – територія екологічної небезпеки. *Scientific Achievements of Modern Society : Abstracts of the 10th International Scientific and Practical Conference*. Liverpool, 221–231.

29 Лепа, В. В., Прогнімак, О. Д. (2021). Проблеми утилізації доменних шлаків у контексті переходу до циркулярної економіки. *Економічний вісник Донбасу*, (1 (63)), 129-145.

30 Dreshpak, O. (2024). Recycling and waste-free technologies in metallurgy. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: A. Pavlychenko, L. Paliekhova. Dresden, 56-58.

31 Бондар, О. І., Риженко, Н. О., Салій, І. В. (2020). Накопичення шлаків металургійних підприємств: оцінка впливу на довкілля та екологічно обґрунтоване поводження. *Теоретична екологія*, (7) 83.

32 Shang, W., et al. (2021). Production of glass-ceramics from metallurgical slags. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128220.

33 Ji, R., et al. (2022). A review of metallurgical slag for efficient wastewater treatment: Pretreatment, performance and mechanism. *Journal of Cleaner Production*, 380, 135076.

34 Weber, T., Stuchtey, M. (2019). Pathways towards a German Circular Economy – Lessons from European Strategies (Preliminary Study). *National Academy of Science and Engineering*.

35 Hosseinian, A., Ylä-Mella, J., Pongrácz, E. (2021). Current status of circular economy research in Finland. *Resources*, 10(5), 40.

## **DRIVERS AND BARRIERS TOWARDS CIRCULAR ECONOMY IN THE METALLURGY OF UKRAINE**

**Artem Pavlychenko, Liudmyla Paliekhova\***

**Keywords:** circular economy, industrial value chains, “green” transition, metallurgical industry, Ukraine.

**The main objectives** of this study were to investigate the concept of circular economy in industry, in particular metallurgy; to confirm the potential of the green transition of Ukrainian metallurgy in the context of its participation in global value chains; to analyse the main motivating factors and barriers for the transition of Ukrainian metallurgical companies to circular technologies.

**Methodology.** Official documents of the European Union, reports and research papers with regard to the subject of the circular economy, metallurgical waste recycling technologies, and green transition issues based on circularity principles provided a theoretical and methodological basis for this study.

**Findings.** The concept of circular economy in metallurgy is considered in the context of the “green” transition of mining and metallurgical value chains. Circularity in metallurgy is studied as a system of sequential interactions between participants of production and supply processes, where each of them has a strategy for reducing industrial waste and transition to circular products, which can be used both in your own enterprise and by other participants in the process. Technologies for the circular use of waste in metallurgy are becoming a competitive advantage and challenge for other players, their implementation leads to creating new raw materials markets and product chains. In addition, some circular requirements are the norm in the European space, creating pressure for their implementation in the Ukrainian metallurgy.

**Conclusions and Recommendations.** The study has revealed that under the tasks of post-war restoration of the Ukrainian metallurgy, circular technologies can play a decisive role in creating a technologically powerful industry for the production of “green” metal. For this, it is important to implement the planned reforms according to the EU Plan RebuildUkraine. In turn, Ukraine should develop its own strategy for circular metallurgy and a clear road map, which should include a sequence of activities and mechanisms for its implementation, in particular for digitalization and support of innovation in the industry.

---

\***Artem Pavlychenko** – Dr. (Technical Science), Professor, Professor of the Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection, First Vice-Rector, Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: pavlichenko.a.v@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0003-4652-9180>. **Liudmyla Paliekhova** – Cand. Sc. (Economic), Associate Professor, Professor of the Marketing Department, Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: Paliekhova.L.L@nmu.one; <https://orcid.org/0000-0003-0217-5755>.



## ГЛАВА 6

# РЕТРОСПЕКТИВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ОСНОВНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ

Олена Матухно, Карина Бєлоконь, Олена Борисовська\*

**Анотація.** В роботі досліджено динаміку екологізації металургійного комплексу України у період 2015-2022 роки. Зроблено акцент на показнику емісії парникових газів при виробництві металу в Україні. Виконано порівняння із загальносвітовими показниками викидів двоокису вуглецю за окремими переділами металургійної промисловості. Визначено, що екологічні показники української металургійної промисловості гірші за європейські у 3-5 разів. При цьому українські підприємства мають значний потенціал скорочення негативних впливів на довкілля, наприклад, потенціал зменшення викидів CO<sub>2</sub> за рахунок впровадження найкращих доступних технологій перевищує загальносвітовий показник більш ніж у два рази. Визначено необхідний комплекс реформ під час повоєнного відновлення металургійних підприємств України для адаптації до вимог Європейського зеленого курсу та сталого розвитку українського металургійного комплексу.

**Ключові слова:** екологічні показники, металургійні підприємства, навколишнє середовище, викиди, емісія CO<sub>2</sub>, відходи, енергоємність, декарбонізація.

### 6.1 Вступ

Світове виробництво чавуну та сталі постійно зростає, довгі роки Україна входила у першу двадцятку серед світових виробників металургійної продукції. Але в останній рік довоєнного періоду внаслідок сукупності зовнішніх і внутрішніх факторів спостерігалось різке падіння показників виробничої продуктивності української металургії (див. табл. 6.1-6.2). Так, в рейтингу світових виробників сталі Україна опустилася з 14 місця у 2021 році на 25 місце у 2022 році [1].

---

\***Олена Вікторівна Матухно** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, НТУ «Дніпровська політехніка», екологічний аудитор, м. Дніпро, Україна, E-mail: matukhno.o.v@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-5536-6745>. **Карина Володимирівна Бєлоконь** - канд. техн. наук, доцент, заступник директора з наукової роботи Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, доцент кафедри прикладної екології та охорони праці за сумісництвом, м. Запоріжжя, Україна, E-mail: kv.belokon@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2000-4052>. **Олена Олександрівна Борисовська** – канд. техн. наук, доцент, завідувачка кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, E-mail: borysovska.o.o@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-7309-0236>.



**Глава 6 Ретроспективне дослідження змін основних екологічних показників  
металургійного комплексу України**

**Таблиця 6.1** – Країни-лідери у виробництві чавуну та сталі у 2019-2020 роках  
(Джерело: [1])

Місце	Країна	Виплавка чавуну, млн. т		Країна	Виплавка сталі, млн. т	
		2019	2020		2019	2020
1	КНР	850,9	887,5	КНР	995,4	1064,8
2	Індія	74,2	67,8	Індія	111,4	100,3
3	Японія	74,9	61,6	Японія	99,3	83,2
4	росія	51,1	51,9	США	87,8	72,7
5	Південна Корея	47,5	45,4	росія	71,7	71,6
6	Бразилія	26,3	24,5	Південна Корея	71,4	67,1
7	Німеччина	25,5	22,5	Туреччина	33,7	35,8
8	Україна	20,1	20,4	Німеччина	39,6	35,7
9	США	22,3	18,3	Бразилія	32,6	31,0
10	Тайвань (Китайська республіка)	14,5	13,4	Іран	25,6	29,0
11	Туреччина	9,9	10,0	Тайвань (Китайська республіка)	22,0	21,0
12	Франція	9,9	7,7	Україна	20,8	20,6
	Світ	1327,1	1319,4	Світ	1874,4	1877,5

Значною мірою падіння обсягів металургійного виробництва пов'язано з несприятливою кон'юктурою світового ринку, проблемами енергозабезпечення та логістики, посиленням екологічних вимог, внутрішніми проблемами регулювання, т. д. Також близько 40% металургійних потужностей України було втрачено ще на початку 2022 року через знищення маріупольських заводів внаслідок військової агресії РФ проти України; багато українських металургійних підприємств перейшли на часткове навантаження, а деякі були змушені тимчасово призупинити роботу.

**Таблиця 6.2** – Показники виробництва основних видів продукції металургійного комплексу в Україні за 2015-2022 роки (Джерело: складено авторами на основі [2-6])

Продукт	Виробництво, млн. т							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Чавун	21,885	23,612	20,147	20,560	20,066	20,423	21,17	6,39
Сталь	22,930	24,236	21,417	21,100	20,848	20,616	21,37	6,26
Прокат	20,115	21,490	18,330	18,361	18,214	18,427	19,08	5,35

При цьому металургійна галузь залишається однією з бюджетоутворюючих в нашій країні. Крім того, Україні знадобиться велика кількість металу під час післявоєнного відновлення для внутрішнього використання.

Також є важливе завдання на збереження експорту української металевої продукції. У зв'язку з цим впровадження механізму вуглецевого прикордонного коригування (*англ.* Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) підіймає ряд болючих питань щодо перспектив експорту української вуглецевосміної продукції до ЄС. Питання оцінки екологічних показників металургійного комплексу України, враховуючі його велику ресурсо-, енерго-, вуглецевосміність, а також екологічні небезпечні впливи на усі інші галузі діяльності, стає особливо актуальним.

*Виділення невирішених раніше частин загальної проблем.* Екологізація металургії України є одним з п'яти стратегічних напрямків розвитку галузі, визначених у дослідженні «Металургія України: Візія 2030» [8]. Зазначимо, що нехтування екологічним обґрунтуванням стратегій розвитку гальмує процес зменшення собівартості кінцевої продукції, не дозволяє отримати «зниження негативного впливу на навколишнє середовище при одночасному підвищенні продуктивності», що якраз і є викликами сталого розвитку для бізнесу і країни.

В зв'язку з євроінтеграційним напрямком руху України, питання дотримання європейських екологічних нормативів в металургійному виробництві напряму пов'язане із забезпеченням конкурентоздатності української продукції на європейському ринку. Розробка дорожньої карти модернізації та декарбонізації українського металургійного комплексу потребує системної оцінки як технологічних, так і екологічних показників вітчизняних підприємств, порівняння їх з європейськими, а також зі світовими показниками сталого розвитку металургійної промисловості; узагальнення інформації та виконання ретроспективного аналізу змін екологічних показників українського металургійного комплексу, визначення та роз'яснення причини та наслідків цих змін.

*Метою цього дослідження* є аналіз динаміки змін основних екологічних показників металургійного комплексу України<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>*Ред.* Мета дослідження, представленого авторами, постає особливо актуальною у світі змін до Закону України «Про охорону атмосферного повітря», що були внесені протягом 2022-2023 рр. з метою посилення відповідальності підприємств за здійснення організаційно-господарських, технічних та інших заходів для забезпечення виконання вимог, передбачених нормативами екологічної безпеки у галузі охорони атмосферного повітря, дозволів на викиди забруднюючих речовин тощо. Зазначимо, що для виконання зміненого законодавства ряд нормативних документів було оновлено та прийнято нові, зокрема Порядок отримання дозволу на викиди (в редакції постанови КМУ від 24 січня 2023 р. № 63); Порядок подання та розміщення звіту про дотримання умов дозволу на викиди (затверджено постановою КМУ від 20 січня 2023 р. № 58); Порядок запровадження обов'язкових автоматизованих систем контролю викидів (затверджено постановою КМУ від 28 березня 2023 р. № 272); форми протоколу публічного обговорення (затверджені наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 21 червня 2023 року № 427) та ін.

У процесі дослідження сформульовано такі завдання: 1) дослідження ретроспективи екологізації та сталого розвитку металургійного комплексу України; 2) порівняльний аналіз викидів двоокису вуглецю за окремими переділами металургійної промисловості України та розвинених країн; 3) визначення необхідного комплексу реформ під час повоєнного відновлення металургійних підприємств України для адаптації до вимог Європейського зеленого курсу та сталого розвитку українського металургійного комплексу.

*Теоретичною та методичною основою дослідження є вітчизняні та закордонні публікації з питань екологічної безпеки та сталого розвитку підприємств металургійної промисловості, статистичні дані, нормативні та рекомендаційні документи. У роботі застосовані такі методи досліджень: аналіз, синтез, класифікація, порівняння, узагальнення.*

## **6.2 Аналіз показників сталого розвитку металургійного комплексу України**

Металургійний комплекс України завжди відрізнявся широким спектром негативних впливів на довкілля. У численних публікаціях [9-14] основними з таких визначаються: трансформація ландшафтів, порушення, деградація та забруднення ґрунтового покриву (порушено понад 33 тис. га земель), вплив на рівні водоносних горизонтів, забруднення підземних та поверхневих вод (підприємства гірничо-металургійного комплексу щорічно скидали понад 1400 млн м<sup>3</sup> стічних вод), забруднення повітря пилогазовими викидами (32% від загальної кількості викидів по Україні), утворення промислових відходів (понад 120 млн т/рік). За даними Національної доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році [15, с. 253] металургійним комплексом накопичено понад 500 млн т шлаків, а також щорічно утворюється 1 млн т шлаків, та 110 тис. т пилу.

Всесвітня асоціація виробників сталі декларує, що метою сучасної металургійної галузі є екологічно безпечний продукт<sup>2</sup> (зокрема – чавун, сталь, прокат тощо).

---

<sup>2</sup>*Ред.* Екологічно безпечний продукт відноситься до категорій «сталий продукт», який протягом усього життєвого циклу (уздовж всього ланцюгу виробничих відносин – від видобутку сировини до остаточної утилізації відходів) реалізує принципи сталого розвитку, тобто забезпечує економічні вигоди, одночасно знижує негативні впливи на довкілля, зберігає природні ресурси та забезпечує основні соціальні цінності. Зрозуміло, що потреба у сталому продукті не може бути задоволена, якщо якась ланка його життєвого циклу не є сталою – еколого-соціально-економічно збалансованою. Основою виробництва сталого (екологічно безпечного) продукту є перехід на «зелені» технології, що можуть мати різний рівень зрілості: 1) впровадження окремих «зелених» інновацій; 2) одночасне «озеленення» основних технологічних процесів; 3) формування сталих ланцюгів створення вартості; 4) трансформація всього сектору (див.: Палехова Л.Л. Управління сталим розвитком: довідник базових понять. Дніпро: НТУ «ДП», 2020).

Процес переходу на екологічно безпечні продукти вимагає системної модернізації виробничих і технологічних процесів та впровадження стандартів екологічної відповідальності, що сприяє одночасному підвищенню ефективності виробництва і зниження його негативного впливу на навколишнє середовище. Починаючи з прийняття Кіотського протоколу, питанням декарбонізації промислової сфери надається значна увага як з боку урядів країн-учасниць, що мають завдання з формування відповідної кліматичної політики для виконання своїх зобов'язань щодо зниження викидів парникових газів, так і з боку споживачів та інвесторів, що все більше підтримують «зелену» продукцію та «зелене» виробництво.

Щоб сприяти сталому розвитку, Всесвітня асоціація виробників сталі (*англ.* World Steel Association, WSA) створила Хартію сталого розвитку (*англ.* Worldsteel Sustainability Charter)<sup>3</sup>, де визначила принципи та критерії сталого розвитку сталеливарної галузі. У зазначеному документі три з дев'яти принципів та сім з двадцяти критеріїв спрямовані на поліпшення екологічних показників металургійних підприємств з метою покращення захисту навколишнього середовища [16].

- Принцип 1: боротьба зі зміною клімату.

Мета: активно протидіяти змінам клімату, втілювати ефективні заходи для мінімізації викидів парникових газів в металургійній галузі.

Критерії: 1.1 Викиди CO<sub>2</sub> та енергоефективність; 1.2 Плани та цілі скорочення викидів CO<sub>2</sub>.

- Принцип 2: циркулярна економіка.

Мета: максимально ефективно використовувати ресурси уздовж життєвого циклу сталевих виробів та підтримувати суспільство в досягненні цілей циркулярної економіки.

Критерії: 2.1 Показники життєвого циклу сталевих продукцій; 2.2 Відходи та побічні продукти.

- Принцип 3: піклування про навколишнє середовище.

Мета: працювати згідно вимогам екологічної відповідальності.

Критерії: 3.1 Поліпшення стану навколишнього середовища; 3.2 Забруднення повітря та води; 3.3 Системи екологічного менеджменту.

---

<sup>3</sup>Ред. Мається на увазі оновлена Хартія сталого розвитку (*англ.* Worldsteel Sustainability Charter), що була опублікована в березні 2022 року. Нова Хартія включає переглянуті принципи сталого розвитку, враховуючи актуальні виклики сучасного суспільства, та передбачає прихильність членів WSA добровільним програмам зі сталого розвитку (наприклад, що стосуються CO<sub>2</sub> та LCI даних, статистики безпеки та охорони здоров'я тощо). Станом на березень 2024 року, понад 40 великих компаній та асоціацій світу беруть активну участь у програмах сталого розвитку виробництва сталі (див.: <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/our-recognitions/sustainability-charter/>).

**Глава 6 Ретроспективне дослідження змін основних екологічних показників металургійного комплексу України**

Кожного року World Steel Association публікує звіти [17-19], у яких представлено показники сталого розвитку металургійної промисловості, де з восьми показників сталості чотири стосуються рівня екологічної сталості (див. рис. 6.1, табл. 6.3).



**Рисунок 6.1** – Екологічні показники сталого розвитку металургійної промисловості (Джерело: [17, с. 5])

**Таблиця 6.3** – Екологічні показники сталого розвитку металургійної промисловості у світі в кількісному вимірі (Джерело: [1; 18-19])

Показники		Одиниці вимірів	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	Викиди CO <sub>2</sub>	т CO <sub>2</sub> /т сирової сталі	1,84	1,81	1,83	1,88	1,91	1,91
2	Енергоємність	ГДж/т сирової сталі	19,85	19,54	19,84	20,38	21,02	20,99
3	Ресурсоефективність	% матеріалу, що перетворений у продукти та побічні продукти	96,49	96,33	97,49	97,86	97,56	97,65
4	Системи екологічного менеджменту (EMS)	% виробництв, де впроваджено системи екологічного менеджменту	96,55	97,08	97,15	96,13	95,66	96,15
	Світове виробництво сталі	млн. т	1 737	1 828	1 877	1882	1962	1885



Як видно з таблиці 6.3, показник «Викиди CO<sub>2</sub>» зростає незважаючи на зусилля розвинених країн з виконання взятих на себе кліматичних зобов'язань. Загалом викиди зростають пропорційно зростанню виробничих обсягів, але це свідчить про недостатню ефективність кліматичних політик, механізмів та інструментів, що застосовуються, наприклад, в Європейському союзі для обмеження і зниження викидів парникових газів для досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року.

Застосування в Європейському союзі такого інструменту як Системи торгівлі викидами (*англ.* EU Emissions Trading System, EU-ETS) з 2005 року по 2019 рік призвело до зниження загального обсягу викидів CO<sub>2</sub> при виробництві сирової сталі по ЄС з 240 млн т лише до 200 млн т. Причому це було пов'язано насамперед зі зниженням обсягів виробництва сирової сталі в ЄС з 190 млн т у 2005 році до 160 млн т у 2019 році [20, с. 19]. Саме тому ЄС впроваджує нові механізми, зокрема СВМ, який декларується як ключовий інструмент досягнення кліматичної нейтральності ЄС до 2050 року [21, с. 10]; очікується, що він дозволить одночасно впливати на скорочення викидів у ЄС та попереджати ризики витоку вуглецю у третіх країнах.

Показники «Енергоємність», «Ресурсоефективність» та «Системи екологічного менеджменту» змінюються відповідно до коливань виробничих результатів, незважаючи на те, що основні металургійні компанії світу активно впроваджують найкращі доступні технології – далі НДТМ (*англ.* Best available techniques, BAT). Як відомо, потенціал зниження енергоємності та викидів парникових газів в металургійній галузі має обмеження, що зумовлені специфікою виробництва металів та іншої продукції металургії. За висновками експертів [22, с. 9] існуючі НДТМ дозволяють знизити викиди лише на 25–30%, що недостатньо для досягнення кліматичних цілей. Потрібне прискорення розробки та широкого промислового впровадження нових технологій вуглецевої нейтральності, наприклад, що базуються на використанні двоокису вуглецю, водню та біогазу [23] у процесах виробництва «заліза прямого відновлення» (*англ.* Direct Reduced Iron, DRI)<sup>4</sup>.

У прагненні країн світу досягти взятих на себе кліматичних зобов'язань, кількість викидів двоокису вуглецю при виробництві продукції перетворюються на фактор конкурентоздатності виробника на міжнародному ринку. На шляху до євроінтеграції для України проблема обмеження та зниження обсягів викидів парникових газів у металургійній галузі стає питанням не лише забезпечення екологічної та кліматичної безпеки, але й питанням економічної конкурентоспроможності [24, 25].

---

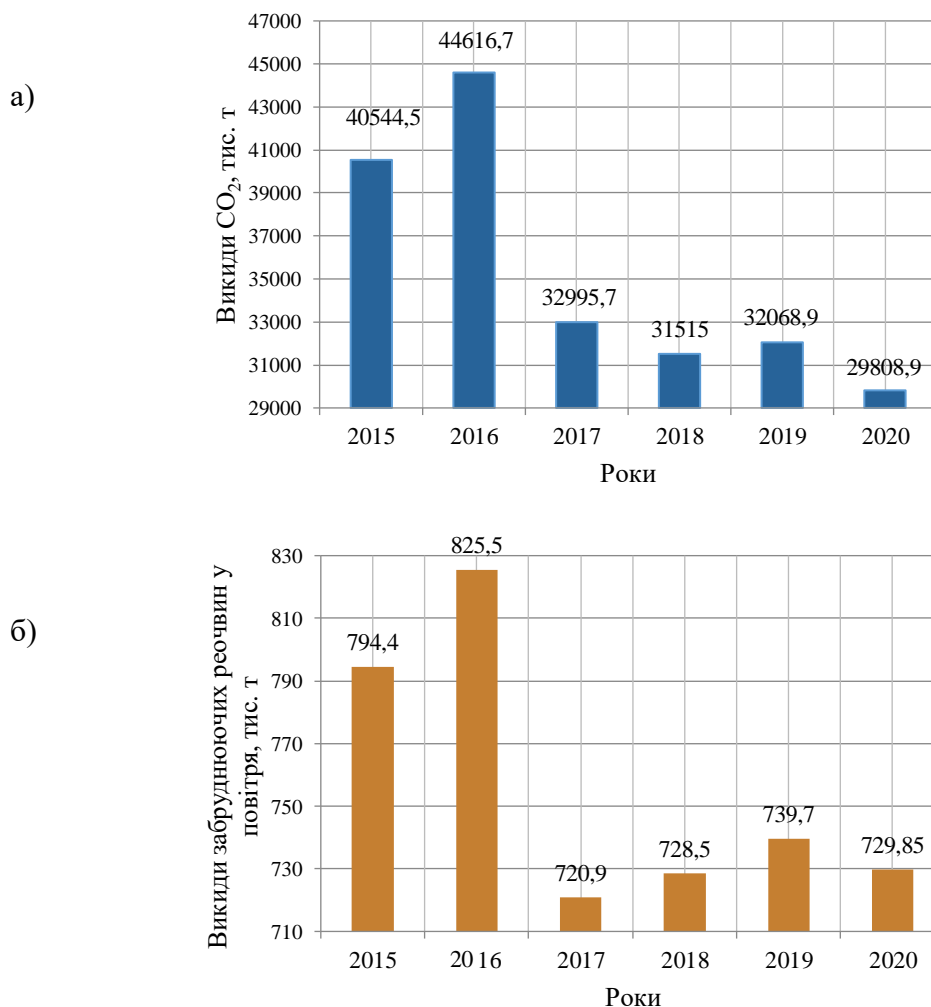
<sup>4</sup>*Ред.* Залізо прямого відновлення (DRI) переважно розуміється як продукт прямого відновлення залізної руди у твердому стані (в окатишах та/або кусковій формі) за допомогою відновників – монооксиду вуглецю та водню, отриманих із природного газу, синтез-газу чи вугілля, тобто без плавлення у доменній печі. Результатом є «тістоподібний», губчастопористий продукт з вмістом заліза 92–95% (див.: DRI production – <https://www.metallics.org/dri-production.html>).



### 6.3 Аналіз екологічних впливів металургійного комплексу України

Спираючись на результати дослідження динаміки змін екологічних показників металургійного комплексу України за останні роки та окремих показників сталого розвитку металургійних підприємств України, зробимо їх порівняння із загальносвітовими показниками.

*Вплив на атмосферу.* Статистика та глобальні звіти свідчать, що на металургійну промисловість припадає приблизно 7–9% від загальних глобальних викидів CO<sub>2</sub>. Для України цей показник значно вище, він досягає 26% (див. табл. 6.2). Тому саме зменшення викидів CO<sub>2</sub> є одним із головних завдань сталого розвитку української металургійної промисловості.



**Рисунок 6.2** – Динаміка викидів у повітря а) CO<sub>2</sub> і б) забруднюючих речовин металургійними підприємствами України (Джерело: складено на основі [12-15])

**Глава 6 Ретроспективне дослідження змін основних екологічних показників металургійного комплексу України**

Якщо зіставити дані табл. 6.2-6.3 і рис. 6.2, можна побачити, що динаміка викидів CO<sub>2</sub> та інших забруднюючих речовин у повітря українською металургійною галуззю має пряму кореляцію з показниками річного виробництва. Тобто зменшенням обсягів викидів у повітря CO<sub>2</sub> та забруднюючих речовин здебільшого обумовлено падінням обсягів виробництва. Останнім часом на суттєве скорочення викидів вплинув також й інший важливий фактор, а саме виведення з експлуатації мартенівських печей металургійних підприємств (див. табл. 6.4). Але, як бачимо, у 2019 році екологічні показники значно погіршуються, що викликано збільшенням обсягів використання природного газу. Також у цей період ряд виробництв перейшли на альтернативне паливо, зокрема вдування пило-вугільного палива у доменні печі, що було зроблено за економічних та технологічних причин.

**Таблиця 6.4** – Виробництво сталі в Україні та світі за різними технологічними процесами (2020-2022 роки) (Джерело: [1])

Рік	Виробництво, млн. т	Киснево-конвертерне, %	Електричні печі, %	Мартенівські печі, %	Інші, %	Усього, %
<b>Україна</b>						
2015	23,0	71,8	5,6	22,6	-	100
2016	24,2	71,7	6,8	21,5	-	100
2017	21,4	70,0	7,0	23,0	-	100
2018	21,1	69,7	7,5	22,8	-	100
2019	20,8	71,2	5,8	23,0	-	100
2020	20,6	75,5	5,5	19,0	-	100
2021	21,4	76,0	5,8	18,2	-	100
2022	6,3	65,5	10,6	-	23,9	100
<b>Світове виробництво</b>						
2015	1617,3	74,4	25,1	0,4	0,1	100
2016	1628,3	74,3	25,3	0,4	0,0	100
2017	1688,2	71,5	28,0	0,4	0,1	100
2018	1807,1	70,8	28,8	0,4	0,0	100
2019	1867,5	71,9	27,7	0,3	0,1	100
2020	1876,3	73,2	26,3	0,3	0,2	100
2021	1949,9	70,8	28,9	0,3	0,0	100
2022	1884,2	71,5	28,2	-	0,4	100

Порівняльний аналіз питомих викидів двоокису вуглецю за окремими переділами металургійної промисловості України та країн світу [26] демонструє, що українські металургійні підприємства конкурентоспроможні на європейському ринку за викидами CO<sub>2</sub>. Так, наприклад:

- Україна входить до першої п'ятірки країн світу з найменшими показниками викидів CO<sub>2</sub> в доменному виробництві: 0,46 т CO<sub>2</sub>/т продукції по Україні при середньому світовому показнику 0,4;

- середні питомі викиди CO<sub>2</sub> на інтегрованих підприємствах (доменна піч-кисневий конвертор) в світі дорівнюють 1,95 т CO<sub>2</sub>/т продукції, в Україні – 2,3 т CO<sub>2</sub>/т продукції. При цьому такі країни світу, що входять в першу десятку виробників, як Японія, США, Південна Корея, Туреччина, Бразилія, мають показники 2,0-2,2 т CO<sub>2</sub>/т;
- показник викидів CO<sub>2</sub> при виробництві сталі в Україні 0,12 т CO<sub>2</sub>/т продукції при середньосвітовому показнику 0,11.

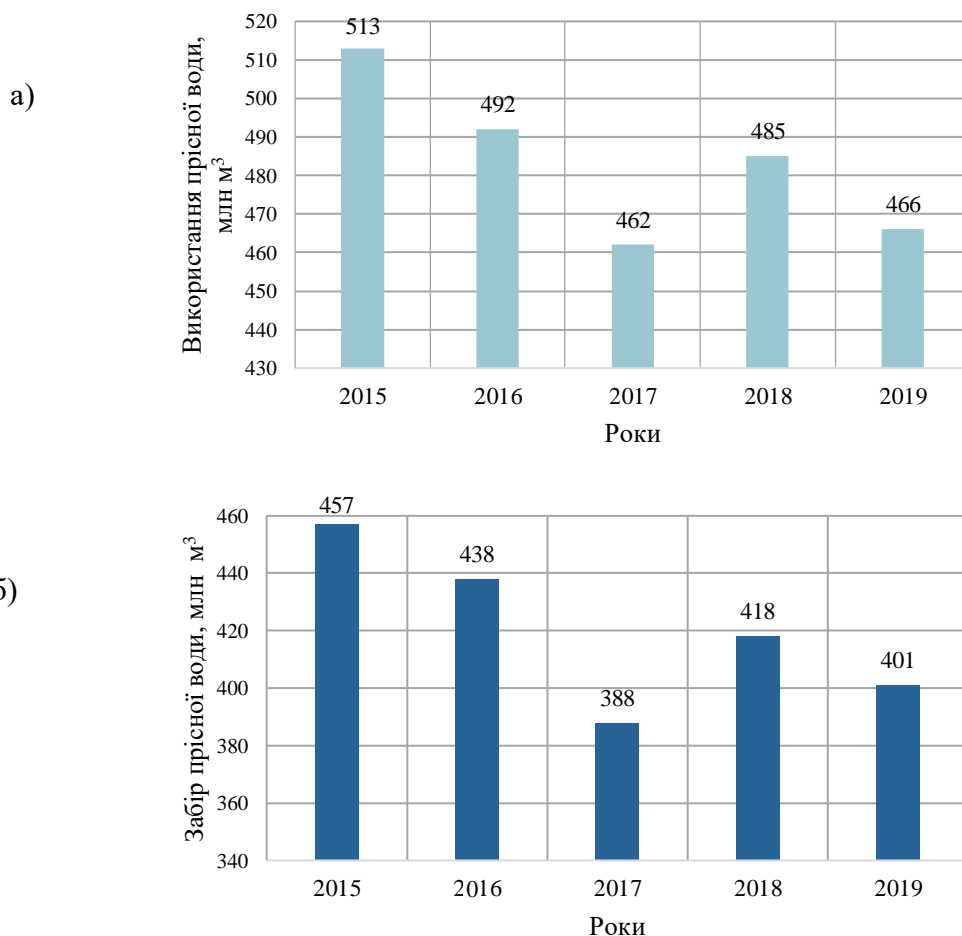
На жаль, українські коксохімічне та агломераційне виробництва у порівнянні зі світовими мають гірші показники за викидами CO<sub>2</sub>, ніж доменне та сталеливарне. Так, показник України за коксохімічним виробництвом 1,1 т CO<sub>2</sub>/т продукції, середній показник по світу – 0,9. Викиди CO<sub>2</sub> в агломераційному виробництві України складають понад 0,8 т CO<sub>2</sub>/т продукції при середньому показнику по світу – 0,61 т CO<sub>2</sub>/т продукції.

Але можливості скорочення викидів CO<sub>2</sub> в Україні за рахунок впровадження найкращих доступних технологій перевищують загальносвітовий показник у понад два рази [27, с. 678]. Це можна пояснити, наприклад, тим, що біля 20% сталі в Україні виплавлялось до 2022 року за застарілою мартенівською технологією (табл. 6.4), відмова від мартенівського виробництва та перехід до більш сучасних способів дозволяє суттєво зменшити викиди CO<sub>2</sub>.

*Вплив на гідросферу.* В Україні водоспоживання на 1 т сталі перевищує європейські показники у 3-6 разів та знаходиться в межах 4,79-12,2 м<sup>3</sup>/т. В Європі середнє споживання води значно нижче і становить від 3,3 до 1,6 м<sup>3</sup> на тонну виробленої сталі [12-15].

Як бачимо, динаміка використання та забору прісної води підприємствами металургійного комплексу, що наведена на рис. 6.3, напряму корелюється із показниками виробництва (див. табл. 6.2). Але показники забору прісної води нижчі за показники використання, оскільки частина підприємств застосовує замкнені водооборотні цикли, де очищають воду та багаторазово використовують її після очистки у технологічних процесах.

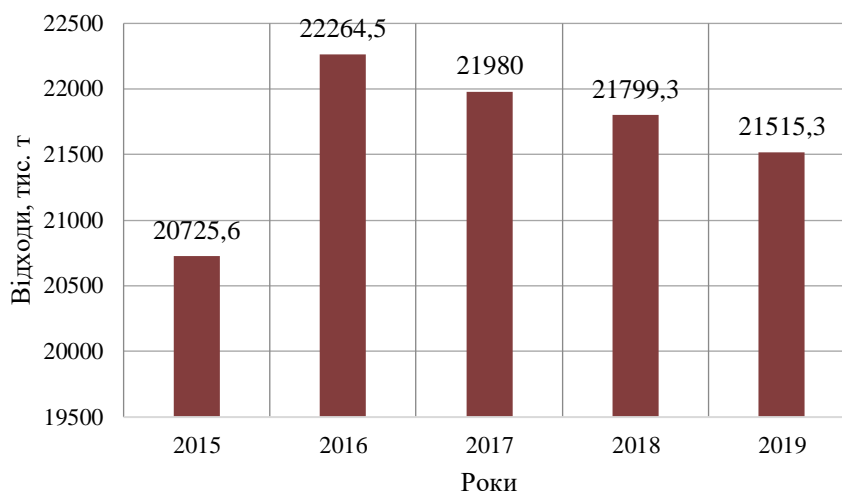
Металургійний комплекс є не тільки одним з найбільших споживачів води – 13-15% кількості води від загальних витрат усіх галузей промисловості, але і займає одне з перших місць за обсягами скидів забруднених стічних вод у поверхневі водні об'єкти України – 17% загального обсягу скидів по Україні; 30-40% стічних вод металургійних підприємств забруднено шкідливими речовинами, серед яких присутні феноли, ціаніди, роданіди, марганець, залізо, хром та ін.



**Рисунок 6.3** – Динаміка а) використання та б) забору прісної води підприємствами металургійної галузі України (Джерело: складено авторами на основі [12-15])

*Вплив на ґрунти.* Вплив на ґрунти може бути як безпосереднім (забруднення ґрунтів відходами виробництва, розливи стічних вод, технічних рідин), так і опосередкованим (через атмосферне повітря, коли пилогазові викиди осідають на ґрунтовий покрив). Зона впливу металургійного підприємства на довкілля може мати радіус 1-5 км і в межах цієї зони спостерігається значний вміст шкідливих речовин у ґрунтах саме через опосередкований вплив [10]. Відомо, що 1 га відвалів металургійного підприємства, що пилить, веде до забруднення приблизно 5 га земель поруч із відвалами.

У металургії також утворюється значна кількість твердих відходів: шлаки, окалина, зола, осушені шлами. Питомий показник утворення шламу на підприємствах України складає 60 – 80 кг/т сталі, у ЄС цей показник складає 30 кг/т [28, с. 132]. Аналіз статистичної документації [12-15] показав, що коливання обсягів виробництва призводять до коливань обсягів відходів. Показники відходоутворення (рис. 6.4) теж мають пряму кореляцію з динамікою обсягів виробництва (див. табл. 6.2).



**Рисунок 6.4** – Динаміка утворення відходів в металургійній галузі України  
(Джерело: складено авторами на основі [12-15])

Таким чином, основними факторами, що впливають на екологічні показники і, відповідно, на сталість металургійного комплексу України, є висока вуглецеємність виробництва, високі питомі показники викидів забруднюючих речовин в повітря, скидів стічних вод і утворення відходів в порівнянні з європейськими (перевищення в 3-5 разів), що призводить до погіршення якості атмосферного повітря, забруднення поверхневих водойм, збільшення кількості відходів у відвалах, хвостосховищах та інших накопичувачах промислових відходів в металургійних центрах України.

### 6.3 Шляхи поліпшення екологічних показників металургійного комплексу України

Повоєнне відновлення української промисловості, зокрема металургії, спирається на комплекс загальних реформ, зокрема, що стосуються адаптації державної екологічної політики до Європейського зеленого курсу, зокрема: реформування системи екологічного оподаткування; прискорення впровадження норм директив та стандартів Європейського Союзу; впровадження системи «зелених» закупівель; посилення інвестування у природоохоронні заходи; стимулювання підприємств до впровадження системи екологічного менеджменту на підприємствах<sup>5</sup>.

Досвід країн-членів ЄС показує, що екологічно сталий розвиток металургійного комплексу вимагає також запровадження низки організаційно-технічних та політичних рішень, а саме:

<sup>5</sup>Ред. Див.: RebuildUkrainePlan на 2024-2027 роки.

1 *Перехід від старих технологій виробництва до інноваційних* дозволяє одночасно знизити промисловий вплив на навколишнє середовище та розширювати ринки збуту через підвищення показників якості продукції та екологізації виробництва. Зокрема такими є перехід від мартенівського виробництва до киснево-конвертерного або електросталеплавильного; виробництво сталі в електричних печах з використанням лому, або збільшення використання лому в киснево-конвертерному виробництві (проект «Primary energy melter» ArcelorMittal та SMS group); системи утилізації тепла, що відходить; сухе тушіння коксу; заміна коксу та пиловугільного палива на деревне вугілля (проект «Torero» ArcelorMittal); синтез-газ (проект «IGAR» ArcelorMittal); водень (ThyssenKrupp, Дуйсбург, Німеччина); відновлювальна плавка (проект «HISARNA», Tata Steel) [22; 29].

2 *Модернізація основного обладнання* дозволяє покращити ефективність використання необоротного активу, зменшити витрати та підвищити продуктивність металургійного виробництва, що в свою чергу допомагає максимально скоротити негативний вплив на навколишнє середовище.

3 *Контроль за використанням сировинних сировини та матеріалів* відповідно до техніко-екологічних вимог дозволяє одночасно підвищити якість продукції та покращити екологічні показники технологічних процесів.

4 *Розробка та впровадження програм і стандартів енергоменеджменту*. дозволяє значно економити у кінцевому споживанні енергії на виробництві, а як наслідок заощаджувати кошти підприємства.

5 *Кадрова політика та зелені робочі місця* – це гідні робочі місця, які є корисними для навколишнього середовища та сприяють боротьбі зі зміною клімату, розглядаються обов'язковими складовими екологізації металургійної сфери.

6 *Інвестиційна політика* – інвестиції у природоохоронні заходи означають активні вкладення у проекти та заходи, що переважно підтримують використання відновлюваної енергетики, зниження рівня викидів вуглецю, сприяння протидії змінам клімату і використання екологічних технологій.

7 *Політика сумісних цінностей* здійснюється шляхом кооперації існуючих підприємств із обмеженою кількістю переділів та великих промислових комплексів з повним виробничим циклом.

Перелічені політичні підходи безумовно спираються на технічну модернізацію та впровадження передових технологій у галузі захисту навколишнього середовища та енергозбереження. Але більшість заходів, що впроваджуються українськими металургійними підприємствами, не є по суті природоохоронними, а полягають у капітальних ремонтах або частковій заміні існуючих очисних споруд та обладнання.



Загалом найкращі доступні технології та методи (НДТМ) поки недостатньо застосовуються в галузі охорони навколишнього середовища. У той же час є приклади успішного впровадження сучасних інновацій у металургійному виробництві, зокрема відповідно до Довідкових документів НДТМ – або BREF (*англ.* BAT reference documents)<sup>6</sup> – наприклад, впровадження машин безперервного лиття заготовок, які значно знижують шкідливий вплив прокатного переділу на навколишнє середовище.

Сьогодні вкрай потрібна системна робота з вивчення, перекладу, адаптації європейських BREF для забезпечення дотримання екологічних нормативів і сталого розвитку металургійних підприємств України. У 2023 році Міндовкілля України залучило до роботи в робочих групах з підготовки пропозицій та висновків щодо НДТМ для металургії провідних фахівців металургійних підприємств та профільних наукових установ. Однак, маємо зазначити, що такі довідники з НДТМ оновлюються лише раз на декілька років та не встигають за науково-технічним прогресом.

Зрозуміло, що впровадження екологічних проектів з урахуванням досвіду європейських країн та кращих досягнень світової науки та практики потребує значних інвестицій. До 2022 року потреби в інвестиціях для досягнення вуглецевої нейтральності виробниками стали в Україні оцінюватися в 25,5 млрд доларів, капітальні інвестиції оцінювалися в 1000 доларів на тону потужності [20, с. 42].

## **6.4 Висновки**

Україна до війни 2022 року входила в групу двадцяти світових лідерів–виробників металургійної продукції. Проте, як підтвердило дослідження, металургійний комплекс України мав екологічні показники у 3-5 разів гірші, чим європейські, і генерував викиди CO<sub>2</sub> в три рази вище середніх світових показників. Беручи до уваги високий рівень морального й фізичного зношення основних засобів багатьох промислових підприємств, Україна проголосила про намір досягти кліматичної нейтральності у 2060 році, що на 10 років пізніше європейської цілі.

---

<sup>6</sup>*Ред.* Довідники НДТМ (або BREF) є результатом Севільського процесу (*англ.* Sevilla Process), що функціонує в Європейському Союзі з метою регулярної оцінки ефективності дії та оновлення екологічних норм. Протягом останніх 20 років цей процес координує Європейське бюро комплексного запобігання та контролю за забрудненням (EIPPCB). Перші BREF були розроблені у допомогу до Директиви 2008/1/ЄС, яка кодифікувала правила видачі дозволів для промислових установок, викладені в Директиві 96/61/ЄС щодо комплексного запобігання та контролю забруднення (IPPC). Сьогодні пропонуються також «горизонтальні BREF», що присвячені наскрізним питанням промислового виробництва в цілому, таким як енергоефективність, промислові системи охолодження тощо; є спеціальний BREF, що розроблений для моніторингу викидів та скидів відповідно до вимог Директиви ЄС про промислові викиди (див.: European Bureau for Research on Industrial Transformation and Emissions – <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>).

Технічне переоснащення та інноваційно-технологічна модернізація з метою зменшення ресурсо- та енергоємності продукції і забезпечення екологічних нормативів захисту довкілля на європейському рівні – стали великим викликом для вітчизняних металургійних підприємств і запорукою збереження їх конкурентоспроможності на світових та європейських ринках.

У зв'язку з останніми новаціями в рамках виконання завдань Європейської зеленої угоди, вимоги екологізації розвитку металургійної галузі стали ще більш актуальними та радикальними. Так, восени 2023 року в ЄС почалося впровадження механізму контролю викидів CO<sub>2</sub>, пов'язаних з імпортом певних категорій товарів до країн-членів ЄС – Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). Українські виробники металургійної продукції, що експортують її до ЄС, мають вже до 31 січня 2024 року подати звіти з розрахунками своїх викидів парникових газів через портал CBAM. Перший звіт передбачено зробити з жовтня 2023 року по 31 грудня 2023 року. З 2026 року на основі цих розрахунків і на різниці між оподаткуванням вуглецевих викидів в ЄС і країні-експортері в Європейському союзі будуть запроваджуватись додаткові платежі, які буде нести імпортер для вирівнювання конкурентного поля.

Неймовірним випробуванням для української металургії стало повномасштабне вторгнення росії та руйнування великої кількості підприємств, що виплавляли сталь – з дванадцяти основних виробників залишилося тільки шість, і лише п'ять продовжують працювати. До війни гірничо-металургійний комплекс забезпечував понад 10% ВВП країни, включно з ланцюгами постачань, на його частку припадало понад 30% експорту товарів – зараз цей показник впав удвічі. Але після шоку першого року повномасштабної війни Україна змогла наростити виплавку сталі. Державна митна служба свідчить, що за підсумками 2023 року цей показник становив 6,2 млн т, тобто лише на 0,5% менше порівняно з 2022 роком, на 70% менше за довоєнний рівень

Для відновлення та модернізації української металургії необхідна нова державна екологічна та кліматична політика, що передбачає запровадження необхідних інструментів фінансового забезпечення декарбонізації промисловості, зокрема за допомогою в рамках Green Deal або кліматичних фондів.

Екологічні проекти металургійних підприємств мають враховувати основні маркери «зеленого» переходу відповідно до Європейського зеленого курсу, а саме: зменшення викидів парникових газів; зменшення загального забруднення навколишнього середовища, зокрема показників промислових викидів та скидів; зменшення ресурсоємності; впровадження систем енергозбереження та використання альтернативних джерел енергії; жорсткий контроль утворення та поводження з промисловими відходами; впровадження рекомендованих НДТМ, зокрема, що стосуються ресурсозберігаючих, маловідходних та циркулярних технологій; розвиток соціального середовища і «зелених» робочих місць.

Слід зазначити, що потенціал покращення екологічних показників завдяки впровадження НДТМ в Україні перевищує середній показник по світу. Однак, як відомо, довідники з НДТМ оновлюються лише раз на декілька років та не встигають за відстеженням результатів науково-технічного прогресу. Тому, вважаємо доцільним започаткувати формування інформаційної бази з питань модернізації та реконструкції металургійного комплексу України не лише на базі BREF, а також на базі вивчення досвіду світових інноваційних проєктів та передових практик.

### **Список використаних джерел**

- 1 World Steel in Figures 2010 to 2023. URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures/>.
- 2 Виплавка сталі та чавуну в Україні у 2016 році – Укрметалургпром. URL: [http://readmetal.com/?p=17430\\$](http://readmetal.com/?p=17430$).
- 3 Результати діяльності ГМК України у грудні та за 12 місяців 2017 року. URL: <https://www.ukrmetprom.org/rezultaty-deyatelnosti-gmk-ukrainy-2/>.
- 4 Підсумки діяльності ГМК України в грудні і за 12 місяців 2018 року. URL: <https://dzi.gov.ua/press-centre/news/pidsumky-diyalnosti-gmk-ukrayiny-v-grudni-i-za-12-misyatsiv-2018-roku/>.
- 5 Підсумки роботи ГМК України у 2020 р. URL: <https://www.ukrmetprom.org/pidsumki-roboti-gmk-ukraini-u-2020-r/>.
- 6 Українські металурги у 2022 році виробили 5,35 млн т прокату. URL: <https://gmk.center/ua/news/ukrainski-metalurgi-u-2022-roci-virobili-5-35-mln-t-prokату/#:~:text=Як%20повідомляв%20ГМК%20Center%2C%20за,6%25%20р.%2Fp>.
- 7 Україна втратила близько 30-40% своїх металургійних потужностей через війну, - «Мегінвест», 29.12.2023. URL: <https://www.rbc.ua/ukr/news/ukraina-poteryala-poryadka-30-40-svoih-metallurgicheskikh-1648579881.html>.
- 8 Металургія України: Візія 2030. URL: <https://gmk.center/wp-content/uploads/2020/11/Metallurgiya-Viziya-2030-dlya-CEV.pdf>.
- 9 Біляєв, М. М., Русакова, Т. І., Колесник, В. Є., Павличенко, А. В. (2017). Визначення зон забруднення гірничо-металургійними та енергогенеруючими підприємствами атмосферного повітря оксидами сірки. *Науковий вісник НГУ*, № 3, 100-106.
- 10 Войтюк, Ю. Ю., Кураєва, І. В., Кроїк, Г. А., Павличенко, А. В. (2014). Еколого-геохімічна оцінка рівня забруднення ґрунтів у районах функціонування металургійних підприємств. *Науковий вісник НГУ*, № 4, 45-51.
- 11 Фещенко, О. Л., Каменева, Н. В. (2016). Оцінка впливу діяльності металургійних підприємств на навколишнє природне середовище України. *Інвестиції: практика та досвід*, № 2, 28-32.
- 12 Національні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoring/natsionalni-dopovidi-prostan-navkolyshnogo-prirodnoho-seredovyshha-v-ukrayini/>.
- 13 Статистичні збірники «Довкілля України» 2010-2020 роки. URL: [https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv\\_u/07/Arch\\_dov\\_zb.htm](https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/07/Arch_dov_zb.htm).

14 Palekhov, D., Palekhova, L. (2019). Responsible Mining: Challenges, Perspectives and Approaches. In: Giovannucci D., Hansmann B., Palekhov D., Schmidt M. (Eds.). *Sustainable Global Value Chains. Natural Resource Management in Transition*. Vol. 2. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 521 -544. DOI: 10.1007/978-3-319-14877-9\_28.

15 Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>.

16 World Steel in Figures 2022. URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/>.

17 Sustainability indicators 2020 report. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-indicators-2020-report.pdf?x65430>.

18 Sustainable steel – Indicators 2020 and steel applications URL:<https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2020/sustainable-steel--indicators-2020-and-steel-applications.html>.

19 Sustainability performance of the steel industry 2004-2022. November 2023. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-indicators-report-2023.pdf>.

20 Mendelevitch, R., Hermann, H., Graichen, V., Bibu, T., Lettow, F., Nissen, Ch. (2022). Development of the iron and steelmaking sector under the EU-ETS. Overview and country-level analysis from 2005 to 2019. As part of joint project with INFRAS, Zurich. Öko-Institut, Berlin. On behalf of the German Environment Agency, Dessau-Roßlau.

21 Хабатюк, О., Андрусевич, А. (2021). Вплив механізму вуглецевого коригування імпорту (СВАМ) на торгівлю України з ЄС. Аналітичний документ. Ресурсно-аналітичний центр «Суспільство і довкілля», (53).

22 Декарбонізація сталеві галузі: виклик на найближчі десятиліття. GMK-Center, Київ, 2021, (47).

23 Dudin, V., Polehenka, M., Tkalich, O., Pavlychenko, A., Napich, H., & Roubík, H. (2024). Ecological and economic assessment of the effectiveness of implementing bioenergy technologies in the conditions of post-war recovery of Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University*, (1).

24 Palekhov, D., Palekhova, L. (2021). Environmental sustainability in achieving the sustainable production and consumption: challenges of a Post-Soviet transition economy. *Transposition of the Acquis Communautaire – Migration and Environment*. Umweltrecht in Forschung und Praxis 66. Verlag Dr. Kovač, Hamburg, 60-87 .

25 Pavlychenko, A., Paliekhova, L. (2024). Achieving environmental sustainability in industrial value chains. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: A. Pavlychenko, L. Paliekhova. Dresden, 15-21.

26 Оцінка конкурентоспроможності виробників сталі України за показниками викидів CO<sub>2</sub>. URL: [https://gmk.center/wp-content/uploads/2022/08/Ud\\_vybrosy.pdf](https://gmk.center/wp-content/uploads/2022/08/Ud_vybrosy.pdf).

27 Matukhno, E., Belokon, K., Shatokha, V., Baranova, T. (2019): Ecological aspects of Sustainable Development of metallurgical complex in Ukraine. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, no. 6 (4), 671–679.

28 Рудь, В., Савюк, І., Самчук, Л., Повстяна, Ю. (2015). Аналіз кількості утворених відходів машинобудування та металургії на території України. *Вісник ТНТУ*, Т. 79, № 3, 130-136.

29 Aries, E., Gómez Benavides, J., Mavromattis, S., Klein, G., Chronopoulos, G. and Roudier, S. (2022). Best available techniques (BAT) reference document for the ferrous metals processing industry. EUR 31321 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-59143-6, doi:10.2760/196475, JRC131649.

## RETROSPECTIVE RESEARCH OF CHANGES IN THE MAIN ECOLOGICAL INDICATORS OF UKRAINIAN METALLURGICAL COMPLEX

Olena Matukhno, Karina Belokon, Olena Borysovska\*

**Keywords:** environmental indicators, metallurgical enterprises, environment, CO<sub>2</sub> emissions, waste, energy consumption, decarbonization.

**Research objectives.** The purpose of the work is the retrospective assessment of changes in the main environmental indicators of the metallurgical complex of Ukraine.

**Methodology.** The theoretical and methodological basis of the study are domestic and foreign publications, statistics, regulations, and recommendations. The research methods are used in the work: analysis, synthesis, classification, comparison, generalization.

**Findings.** The environmental performance of the metallurgical complex of Ukraine in 2015-2022 was 3-5 times worse than European ones, and greenhouse gas emissions were three times higher than the global average. On the way to European integration for Ukraine, the problem of limiting and reducing greenhouse gas emissions in the metallurgical industry becomes not only an issue of environmental and climate safety, but also an issue of economic competitiveness. A comparative analysis of specific carbon dioxide emissions by individual processes in the metallurgical industry of Ukraine and the world shows that Ukrainian metallurgical enterprises are competitive in terms of CO<sub>2</sub> emissions in blast furnace and steelmaking processes, but coke and sintering enterprises have the worst indicators compared to the world.

**Conclusions and Recommendations.** During the post-war recovery of Ukrainian metallurgical enterprises, a set of reforms (organizational, technical and political solutions) is needed to adapt to the requirements of the European Green Deal and sustainable development of Ukrainian metallurgical production. In order to restore and modernize Ukrainian metallurgy, a new state environmental and climate policy is needed, including the introduction of the necessary tools for financial support of decarbonization of the industry, in particular through the Green Deal or climate funds.

---

\***Olena Matukhno** – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of Department of Ecology and Environmental Technologies, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, E-mail: [matukhno.o.v@nmu.one](mailto:matukhno.o.v@nmu.one), <https://orcid.org/0000-0001-5536-6745>. **Karina Belokon** – Ph.D., Associate Professor, Deputy Director for Research of the Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebny of Zaporizhzhia National University, Part-time Associate Professor of Applied Ecology and Occupational Safety, Zaporizhzhia, Ukraine, E-mail: [kv.belokon@gmail.com](mailto:kv.belokon@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2000-4052>. **Olena Borysovska** – Ph.D., Associate Professor, Head of Department of Ecology and Environmental Technologies, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,, E-mail: [borysovska.o.o@nmu.one](mailto:borysovska.o.o@nmu.one), <https://orcid.org/0000-0001-7309-0236>.



## ГЛАВА 7

# ШЛЯХИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Володимир Шатоха\*

**Анотація.** Розглянуто сценарії технологічної трансформації чорної металургії у світі та в Україні задля скорочення викидів парникових газів. Підтверджено, що еко-інноваційний розрив може бути подоланий лише через впровадження технологій уловлювання та захоронення або використання CO<sub>2</sub>. Експортна орієнтація металургійної галузі України робить її вразливою до змін в глобальній економіці. Застосування механізму вуглецевого корегування імпорту у ЄС може становити загрозу конкурентоспроможності для українських металургів на європейських ринках. Залучення світового капіталу за схемами проектів спільного впровадження в рамках Кіотського Протоколу може забезпечити реалізацію проектів з трансферу технологій для прискорення модернізації української металургії.

**Ключові слова:** чорна металургія, викиди парникових газів, сценарії розвитку, технологічна трансформація, вуглецеве коригування імпорту.

### 7.1 Вступ

Чорна металургія є другою за обсягом споживання енергії та першою за рівнем викидів діоксиду вуглецю промисловою галуззю у світі [1], тому досягнення глобальних завдань зі скорочення викидів парникових газів неможливо без впровадження відповідального виробництва та споживання та суттєвої технологічної трансформації у цієї галузі. На просторі ЄС та в деяких інших країнах з розвинутою металургією в останні роки приділяється велика увага реформуванню та інноваційним змінам сталеливарних компаній, спостерігається тенденція до відносного скорочення споживання сталі. Зокрема Китай, який є світовим лідером з виробництва сталі і щорічно викидає в атмосферу мільярди тон еквівалента вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>), сьогодні проводить політику декарбонізації металургії і впроваджує безліч мегапроектів з виробництва низьковуглецевої сталі [2].

Особливу ситуацію має Україна, яка протягом останніх тридцять років майже втричі скоротила валові викиди парникових газів, проте більшість технологій та техніки у металургії залишалися застарілими, тому питомі викиди парникових газів на одиницю сталевих продукції в Україні продовжували бути найвищими у світі [3].

---

\*Володимир Шатоха – д.т.н., професор кафедри металургії чавуну і сталі, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна. E-mail: shatokha@metal.nmetau.edu.ua; <http://orcid.org/0000-0001-6024-0557>.



Слід зазначити, що країна експортувала близько 85% виробленої сталі, водночас для цілей модернізації транспортної, промислової та комунальної інфраструктури потреба в сталі перевищувала 300 млн т, не враховуючи дедалі зростаючу потребу в сталі на відновлення зруйнованої інфраструктури країни [4]<sup>1</sup>. Перед вітчизняною металургією постає ряд викликів щодо подальшого розвитку, і всі вони передбачають зростання як виробництва, так і споживання. Враховуючи курс України на декарбонізацію промисловості<sup>2</sup>, питання технологічної трансформації мають стати невід’ємною складовою стратегії повоєнного відновлення металургійної галузі.

*Мета дослідження.* Глава присвячена дискусії стосовно питань низьковуглецевої трансформації металургійної галузі. Питання розглядаються у контексті впровадження Європейським Союзом спеціального митного податку, що враховуватиме рівні викидів парникових газів при виробництві сталі.

## **7.2 Глобальні сценарії розвитку чорної металургії**

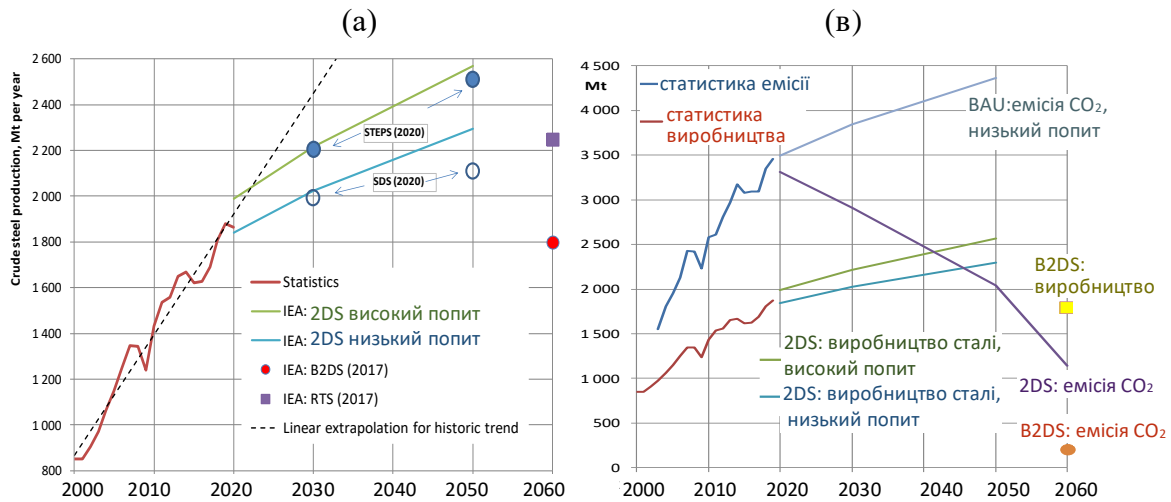
Як відомо, після тривалої стагнації виробництва сталі протягом 1970-х -1990-х років, за останні 20 років у річне світове виробництво сталі зросло більше ніж за всю попередню історію людства. Розглянемо найбільш авторитетні сценарії, які аналізують майбутні обсяги виробництва і споживання сталі у світі та моделюють можливі траєкторії зміни викидів парникових газів металургійною галуззю за умови впровадження тих чи інших технологій різного ступеню інноваційності.

Найбільш фундаментальним є сценарій 2°C Scenario (2DS), розроблений та оприлюднений у 2014 році Міжнародним енергетичним агентством (МЕА) [5]. Слід зазначити, що цей сценарій спирається на припущення про більш суттєву трансформацію енергетичного та промислового секторів, ніж це спостерігалось на той час і навіть на сьогодні. На рис. 7.1 (а) проілюстровано траєкторії зміни виробництва чорної сталі за двома варіантами сценарію 2DS – з низьким та високим попитом на сталь. Як видно, фактичне виробництво у 2020 році лише трохи перевищує сценарій з низькою потребою, що засвідчує загальну репрезентативність даного сценарію.

---

<sup>1</sup>*Ред.* Від початку повномасштабного вторгнення в Україну металургійна промисловість зазнала колосального удару, порівняно з 2013 роком було втрачено більше 80% виробничих потужностей галузі; експорт металопродукції скоротився на 24,3%, споживання металу на внутрішньому ринку впало щонайменше вдвічі – до 2 млн т. Проте виконання плану повоєнного відновлення України вимагає збільшення металопродукції для внутрішнього споживання приблизно до 15 млн т (більше див. у главі 1 цієї монографії). За висновками консалтингової фірми GМК Center, якщо галузь не буде модернізуватися, то через запровадження в ЄС СВМ український метал стане неконкурентним на ринках ЄС (див.: <https://ua.boell.org/uk/2021/11/16/klimatychni-tsil-ta-ukrayinska-promyslovist-modernizuyusa-abo-prohray>).

<sup>2</sup>*Ред.* 30 липня 2021 року уряд України затвердив нову кліматичну ціль України – оновлений національно визначений внесок (НВВ2) до Паризької угоди, глобального договору з боротьби зі змінами клімату. Нове зобов’язання передбачає до 2030 року скоротити викиди парникових газів до рівня 35% порівняно з 1990 роком, тобто на 7% від рівня 2019 року.



**Рисунок 7.1** – Статистичні дані та сценарії розвитку  
(а) світового виробництва сталі; (в) траєкторій викидів CO<sub>2</sub>  
(Джерело: побудовано на основі [1; 5; 6])

У 2017 році було розроблено Reference Technology Scenario (RTS) [5], який бере до уваги зобов'язання країн зі скорочення викидів та підвищення енергоефективності, включаючи ті, що прийняті межах Паризької Угоди. Моделювання за цим сценарієм засвідчило, що він матиме результатом обмеження глобального потепління у межах лише 2,7°C до 2100 року, після чого температура навряд чи стабілізуватиметься та, скоріш за все, продовжить зростати. Звичайно, такий результат є несумісним з кліматичними завданнями, що передбачають обмеження глобального потепління в рамках 1,5°C згідно з Паризькою Угодою 2015 року. Втім, навіть цей сценарій представляє суттєвий відхід від “business as usual” та має на меті визначення наслідків існуючої політики у галузі клімату. Як видно з рис. 7.1 (а), цей сценарій можна розглядати як продовження тренду, визначеного сценарієм 2DS з низькою потребою.

Одночасно, у 2017 році було оприлюднено Beyond 2°C Scenario (B2DS) [7], який досліджує наскільки впровадження технологій, які вже наявні, або знаходяться у розробці, можуть призвести людство поза межами (beyond) сценарію 2DS. Цей дуже амбітний сценарій припускає, що заходи з удосконалення та запровадження нових технологій сягнуть максимуму, забезпечуючи викиди нетто-0, у 2060 році та, можливо, стають від'ємними після цього, не вимагаючи непередбачуваних технологічних проривів та обмежень економічного зростання. Сценарій є сумісним (50% вірогідність) з утриманням глобального потепління у межах 1.75°C, тобто відповідає завданням Паризької Угоди. Зокрема, він припускає, що енергетичний сектор також сягне нетто-0 викидів близько 2060 року завдяки використанню біоенергії та технологій уловлювання й захоронення CO<sub>2</sub> (CCS). Згідно із цим сценарієм світове виробництво сталі у 2060 році має бути меншим ніж у 2020 році.

У жовтні 2020 року було оприлюднено Stated Policies Scenario (STEPS) – сценарій оголошених політик. STEPS припускає, що потепління утримується в межах 1.8°C до 2100 року (66% вірогідність) і відповідні економічні стимули будуть запроваджені для відновлення від Covid-19 [1]. STEPS є подібним до 2DS з високою потребою на сталь, а SDS коригує 2DS з низькою потребою у бік зменшення виробництва.

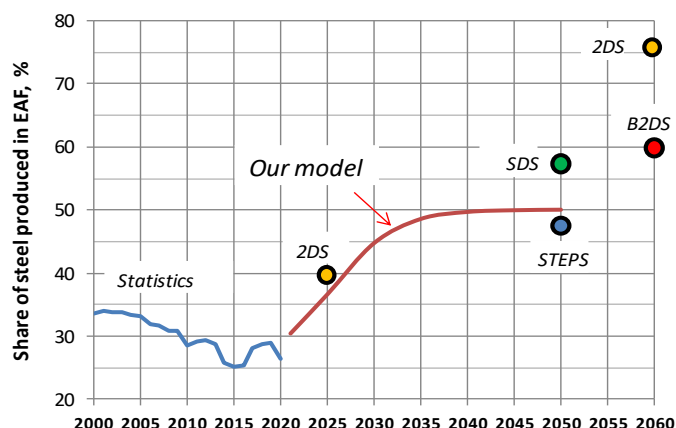
Загалом усі зазначені вище сценарії щодо майбутнього виробництва є цілком ймовірними, але певний виклик являють собою сценарії викидів парникових газів. Так, сценарій 2DS передбачає, що до 2050 року відносно 2011 року виробництво сталі зросте на 51%, але викиди CO<sub>2</sub> у чорній металургії зменшаються одночасно на 28%. Сценарій B2DS бачить, що до 2060 року відносно 2017 року річні викиди CO<sub>2</sub> зменшаються на 91% одночасно зі збільшенням виробництва сталі на 10%. Як видно з рис. 7.1 (в), такі тренди є небаченими в історії – викиди CO<sub>2</sub> завжди змінювалися пропорційно виробництву, зараз зростання виробництва має супроводжуватися скороченням викидів.

### **7.3 Технологічні засоби забезпечення сценаріїв розвитку чорної металургії**

Враховуючи рівні питомих викидів та частку окремих технологічних ланок у загальних викидах, суттєве скорочення викидів CO<sub>2</sub> можливе шляхом: (1) збільшення частки вторинної металургії; (2) підвищення енергоефективності шляхом впровадження найкращих доступних технологій (НДТ); (3) підвищення частки виробництва металізованої сировини (DRI) з використанням природного газу та скорочення використання вугілля для виробництва DRI; (4) впровадження інноваційних технологій, зокрема виробництво чавуну шляхом рідкофазного відновлення, яке виключає потребу в огрудкуванні сировини; (5) впровадження технологій уловлювання та захоронення/використання діоксиду вуглецю (CCSU).

Розглянемо деякі аспекти виробництва сталі зі скрапу. У Німеччині за схемою виробництва скрап/Електродугова піч (ЕДП) питомі викиди CO<sub>2</sub> на тонну сталі складають 530,6 кг CO<sub>2</sub>, у той час як за схемою доменна піч/конвертер – 1815,8 кг CO<sub>2</sub>. Отже, збільшення частки виробництва сталі зі скрапу є важливим засобом скорочення викидів парникових газів. Втім, вторинне виробництво не в змозі повністю замінити інтегровану схему з огляду на кращу якість продукції з первинних матеріалів. Також до 2050 року наявного скрапу вистачить тільки близько на 50% вторинної сталі [8].

Сценарій 2DS передбачає, що світове виробництво сталі у ЕДП має сягнути 40% у 2025 році при відповідному скороченні виробництва сталі у конвертерах, що забезпечить скорочення загальних потреб в енергоносіях на 6% та скороченні викидів CO<sub>2</sub> на 11% [7]. Втім, як видно з рис. 7.2, наявний статистичний тренд не збігається як з короткотерміновими, так і з довготерміновими сценаріями МЕА, що пов'язане зі зростанням виробництва сталі в Китаї, насамперед, за інтегрованою схемою.



**Рисунок 7.2** – Статистичні дані, сценарії МЕА та моделювання зміни частки виробництва сталі в ЕДП; аббревіатури – в тексті (Джерело: розроблено на підставі джерел [1; 5; 6])

Слід також додати, що електрифікація виробництва сталі не має сенсу без декарбонізації генерування електроенергії. Сценарій B2DS [5] припускає, що: (1) світова генерація електрики буде повністю декарбонізована до 2050 року; (2) частка електроенергії з відновлювальних джерел сягне 74% у 2060 році, причому виробництво електроенергії без застосування CCS припиняється до 2040 року; (3) середньосвітовий показник питомих викидів CO<sub>2</sub> при виробництві електроенергії стане від’ємним після 2050 року і сягне -10 гCO<sub>2</sub>/кВт·г у 2060 році. Щоб зрозуміти рівень амбітності цих припущень згадаємо, що у 2020 році середньосвітовий показник питомих викидів CO<sub>2</sub> при виробництві електроенергії становив + 520 гCO<sub>2</sub>/кВт·г [9].

Стосовно підвищення енергоефективності шляхом впровадження найкращих доступних технологій (НДТ), за даними Worldsteel [10] у середньосвітовому вимірі середня витрата енергії може бути скорочена максимум на 15-20%. Зокрема, в ЄС більшість НДТ вже застосовано – потенціал скорочення витрат енергії складає десь 10% – менш ніж на 2 ГДж/т сталі [11]. Втім, в Україні, де досі застосовуються мартенівський спосіб виробництва сталі та розливка у злитки, цей потенціал є набагато більшим. За даними дослідження [12], впровадження НДТ в українській металургії може забезпечити скорочення викидів CO<sub>2</sub> принаймні на 21,8%.

Збільшення частки виробництва металізованої сировини (DRI) з використанням природного газу та скорочення використання вугілля теж є одним з важливих шляхів скорочення викидів парникових газів, оскільки викиди CO<sub>2</sub> за схемою DRI/ЕДП приблизно на 30% нижче, ніж за схемою доменна піч/конвертор [13]. Обмеженням цієї схеми у світовому вимірі є важка доступність до дешевого природного газу та металургійної сировини з високим (65-67%) вмістом заліза. Також слід зазначити технологію HYBRIT, яка проходить пілотні дослідження у Швеції і у 2025 році має вийти на рівень комерціалізації [14]. Детальний аналіз цих технологій виконано в роботі [15].

І все ж спостерігається досить невеликий прогрес у впровадженні інноваційних технологій в світовій металургії. В розвинутих країнах промислові компанії останніми роками надто багато інвестували в модернізацію, щоб зараз ризикувати освоєння недостатньо випробуваних інноваційних рішень. Втім, в Україні можливе поступове впровадження інноваційних технологій, зберігаючи та використовуючи частину існуючої інфраструктури (наприклад – повітрянагрівачів, газоочистки тощо). Залучення світового капіталу за схемами проектів спільного впровадження, що використовувалися в рамках Кіотського Протоколу, могло б забезпечити реалізацію таких проектів, але наразі подібні механізми інвестування не розглядаються.

#### 7.4 Моделювання світових викидів CO<sub>2</sub> при виробництві сталі

Динаміку впровадження інноваційних технологій моделювали на основі розрахунку S-подібної кривої, яка зазвичай добре описує розповсюдження інновацій у промисловості [16] з використанням спрощеного рівняння для сігма-функції [17].

$$n_t = \frac{M}{1 + \exp\left[\frac{-\ln(81)}{\Delta t} \cdot (t - (t_r + \Delta t / 2))\right]},$$

де  $n_t$  – частка технології на ринку у поточному році;  $M$  – межа насичення (максимальна частка технології на ринку після того, як вона стає мейнстрімом);  $t_r$  – рік початку швидкого зростання (після 10% від  $M$ ),  $\Delta t$  – термін захоплення ринку (зростання з 10% до 90%),  $t$  – поточний рік, фактор 81 являє відношення меж насичення (10% та 90%), розрахованого як  $(90 \times 90) / (10 \times 10)$ .

Для впровадження НДТ інноваційних технологій розглядали рівні декарбонізації у 10, 20 та 30%. На рис. 7.3 наведено результати моделювання для варіанту помірно швидкої модернізації: початок комерціалізації, швидкого зростання та насичення – відповідно 2025, 2030 та 2050 роки; обсяг виробництва сталі – за сценарієм SDS. Бачимо, що варіант поточних політик (BAU, business as usual) може забезпечити стабілізацію викидів CO<sub>2</sub> завдяки впровадженню стратегій матеріальної ефективності, передбачених в SDS. Але потенціал скорочення викидів буде повністю вичерпаний після 2035 року. Впровадження виробництва сталі зі скрапу за нашою моделлю має потужний ефект зі скорочення викидів, який вичерпується після 2040 року.

Впровадження інноваційних технологій, навіть якщо вони забезпечують скорочення викидів CO<sub>2</sub> на 30% (що не є реалістичним з огляду на існуючі досягнення), теж не залишає можливостей подальшого скорочення викидів принаймні після 2050 року. Цей еко-інноваційний розрив може бути подоланий лише шляхом впровадження технологій уловлювання та захоронення/використання діоксиду вуглецю (CCSU).

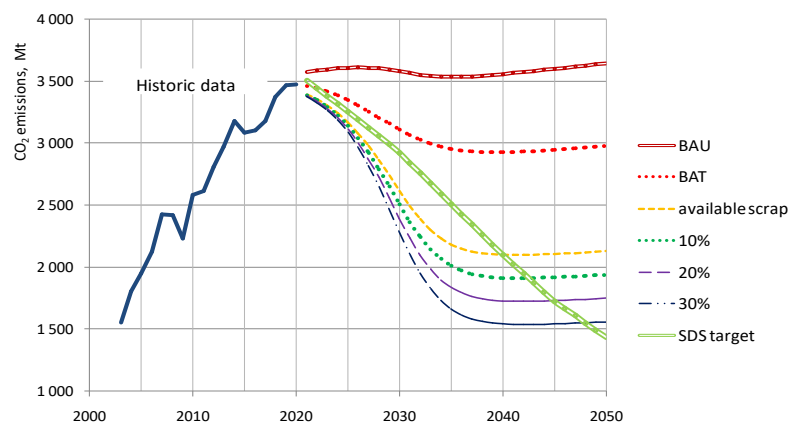


Рисунок 3.4 – Результати моделювання траєкторій викидів CO<sub>2</sub> за різними сценаріями (Джерело: побудовано з використанням даних [1; 6])

## 7.5 Технології уловлювання та захоронення/використання діоксиду вуглецю

Більшість сценаріїв технологічної трансформації з метою запобігання зміни клімату передбачає впровадження технологій уловлювання та захоронення чи використання діоксиду вуглецю (CCSU, Carbon Capture and Storage/Utilization). Для розвитку цього шляху існують ще суттєві бар'єри, зокрема в багатьох країнах ЄС впровадження CCS юридично заборонено) [18]. Але є досвід успішних проривних проєктів.

В 2016 році компанія Al Reyadah, спільне підприємство Masdar та Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC), запровадила технологію уловлювання викидів CO<sub>2</sub> на підприємстві Emirates Steel в Абу Дабі та їх транспортування до свердловин ADNOC з метою підвищення нафтовіддачі (enhanced oil recovery, EOR). Уловлювання CO<sub>2</sub>, що утворюється при виробництві DRI, здійснюється з застосуванням традиційного адсорбційного методу на основі моноетаноламіну (C<sub>2</sub>H<sub>7</sub>NO) [19]. Проєкт включає компресійну станцію поряд з Emirates Steel, куди CO<sub>2</sub> транспортується при низькому тиску, далі CO<sub>2</sub> зневоджується, компримується та подається до трубопроводу для транспортування на відстань 43 км через трубу (діаметр 8 дюймів) для закачування до свердловин ADNOC. Потужність установки до 0,8 млн т CO<sub>2</sub> на рік. Бюджет проєкту, включаючи трубопровід, склав \$ 122 млн. Emirates Steel – це перший і поки єдиний у світі виробник сталі, який здійснює CCS у таких масштабах.

Щодо використання CO<sub>2</sub> замість захоронення, у Бельгії в рамках проєкту Steelanol металургійне підприємство ArcelorMittal Gent буде першим в Європі і у світі заводом з виробництвом біоетанолу з доменного газу. Річне виробництво має сягнути 80 млн л біоетанолу, охоплюючи близько 15% всіх викидів технологічних газів на підприємстві. Вже інвестовано €165 млн, запуск очікується у 2022 [20].



Незважаючи на зазначені успіхи є й певні застереження на шляху просування нових технологій. Так, масштабне впровадження CCS та CCU може призвести до суттєвого збільшення споживання електроенергії у світі [21]. Також масштабні проекти CCS суттєво збільшать потребу в сталі для установок уловлювання, компримування, трубопроводів, свердловин, бурових установок тощо. Зрештою екологічний вплив від захоронення великої кількості CO<sub>2</sub> наразі не досліджено.

## **7.6 Виклики механізму вуглецевого корегування імпорту**

Україна, яка експортує близько 85% виробленої сталі, є дуже вразливою до проблем глобальної економіки. Подальша участь української металургії значною мірою залежить від ретельного виконання зобов'язань за Угодою про асоціацію, яка, зокрема, передбачає впровадження системи торгівлі квотами на викиди парникових газів, що може призвести до додаткових витрат для виробників сталі. У цьому контексті СВAM – механізм вуглецевого корегування імпорту до ЄС розглядається як екзистенційна загроза: протягом перехідного етапу (2023-2025 рр.) імпортери повинні будуть повідомляти про викиди, закладені в їхніх товарах, без сплати фінансового коригування. Далі експортерам до ЄС доведеться сплачувати додаткове мито пропорційно до різниці між викидами парникових газів на одиницю своєї продукції та в ЄС.

На наш погляд, є зауваження щодо справедливого впровадження СВAM:

1) Україна має дуже різну виробничу інфраструктуру, яка відрізняється від середньої в ЄС. Тому справедливий підхід не повинен базуватися на порівняльних статистичних значеннях викидів. Орієнтовні значення мають калібруватися на основі даних про питомі викиди, виходячи з умов подібності інфраструктури.

2) В останні роки Україна збільшувала експорт чавуну, переважно до ЄС. Хоча експортований чавун використовується для виробництва сталі в ЄС, викиди, пов'язані з виробництвом чавуну, інвентаризуються в Україні, а не в ЄС. Це ставить Україну в невідгідне положення при застосуванні СВAM.

3) Україна повністю покладається на власні залізорудні матеріали. Усі викиди парникових газів, що стосуються виробництва окатишів та агломерату, враховуються в кадастрі. ЄС використовує велику кількість імпортних окатишів та DRI (близько 2 млн т щорічно тільки DRI). Викиди, що відбулися в інших країнах світу при виробництві цієї сировини, в статистиці ЄС не враховуються.

4) Українські металурги з 2022 року платять податок 30 грн/т CO<sub>2</sub>. [22]. Європейські металургії включені до переліку «уразливих до витоку» (в ЄС такими є промислові галузі, де існує ризик перенесення виробництва до інших країн за умов занадто несприятливого податкового тиску) і звільнені від сплати за дозволи на викиди CO<sub>2</sub> (статус зафіксований до 2030 року з поступовим припиненням з 2026 року).

## 7.7 Висновки і рекомендації

Суттєве скорочення викидів CO<sub>2</sub> можливе наступними методами: збільшення частки вторинної металургії; підвищення енергоефективності через впровадження НДТ; підвищення частки виробництва металізованої сировини; застосування інноваційних технологій виробництва чавуну, впровадження технологій уловлювання, захоронення чи використання діоксиду вуглецю. Збільшення виробництва сталі зі скрапу є важливим засобом скорочення викидів парникових газів. Але вторинне виробництво не в змозі повністю замінити інтегровану схему з огляду на кращу якість продукції з первинних матеріалів та нестачу скрапу к глобальному вимірі в достатній кількості.

Впровадження інноваційних технологій поки має невеликий прогрес внаслідок різних причин. Зокрема, останніми роками промислові компанії багато інвестували в проекти модернізації і не готові відмовитися від перевірених технологій та перейти на ризикові інноваційні рішення. В країнах з недостатньо модернізованою галуззю перехід на інноваційні технології можна було б підтримати за схемами спільного впровадження в рамках Кіотського Протоколу, але наразі подібні механізми інвестування не розглядаються.

Залучення світового капіталу могло б стимулювати реалізацію таких проектів в,

Моделювання показало, що, навіть за умови комерціалізації та широкомасштабного впровадження найбільш радикальних інновацій, після 2050 року лишається еко-інноваційний розрив, який може бути подоланий лише шляхом впровадження технологій уловлювання та захоронення / використання діоксиду вуглецю, хоча є й застереження на шляху просування таких технологій. Зокрема, широкомасштабне впровадження CCS та CCU може призвести до суттєвого збільшення споживання електроенергії у світі та потреби на сталь для установок уловлювання, компримування, трубопроводів, свердловин, бурових установок тощо.

Надмірна експортна орієнтація металургійної галузі України робить її дуже вразливою до проблем глобальної економіки. Так, застосування механізму СВМ є загрозою конкурентоспроможності і вимагає швидкої модернізації галузі. Сьогодні потрібні переконливі політичні рішення щодо механізмів фінансової підтримки для розробки та впровадження інноваційних технологій, а також трансферу найкращих доступних технологій, що має забезпечити швидку технологічну трансформацію металургійного виробництва з урахуванням проблем повоєнного відновлення.

### Список використаних джерел

1 Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking (2020). OECD/IEA, Paris (190).

2 Wan, F., Li, J., Han, Y., & Yao, X. (2024). Research of the impact of hydrogen metallurgy technology on the reduction of the Chinese steel industry's carbon dioxide emissions. *Sustainability*, 16(5), 1814.

3 Palekhova, L., Palekhov, D. (2017). Anwendung von Energieeffizienzkriterien für Marktstrategien von Großunternehmen in den Transformationsländern. *Energieeffizienz im Bau und Maschinenwesen* [Herausgeber: K.Fraña, S.Simon, J.Grunewald]. Technische Universität in Liberec, 44-53.

4 Амоша, О. І. та ін. (2023). Деякі концептуальні пропозиції Інституту економіки промисловості НАН України щодо підтримки та розвитку вітчизняної промисловості під час воєнного стану та повоєнної неіндустріальної модернізації. Вісник економічної науки України.

5 Energy technology perspectives 2014. Harnessing electricity's potential. OECD/International Energy Agency, Paris, (382).

6 World Steel Association. Statistical reports. URL: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>.

7 Energy Technology Perspectives: Catalysing energy technology transformations. OECD/IEA, Paris, 2017, 33 p.

8 Pauliuk, S., Milford, R. L., Müller, D. B., Allwood, J. M. (2013). The steel scrap age. *Environ Sci Technol.* 2013 47(7), 3448-3454.

9 Global Energy Review 2021, IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>.

10 World Steel Association (2019). Fact sheet: Energy use in the steel industry. URL: [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f07b864c-908e-4229-9f92-669f1c3abf4c/fact\\_energy\\_2019.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f07b864c-908e-4229-9f92-669f1c3abf4c/fact_energy_2019.pdf).

11 European Commission (2016). Technical Report accompanying the Study on the Energy Saving Potential of Increasing Resource Efficiency, Brussels [https://ec.europa.eu/environment/enveco/resource\\_efficiency/pdf/studies/technical\\_report.pdf](https://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/studies/technical_report.pdf).

12 Shatokha, V. et al. (2020) Potential means to reduce CO<sub>2</sub> emissions of iron and steel industry in Ukraine using best available technologies. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 6:451–462, <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00289-0>.

13 Shatokha, V. (2016). Environmental sustainability of the iron and steel industry: Towards reaching the climate goals. *European Journal of Sustainable Development*, 5 (4), 289-300.

14 HYBRIT: fossil free steel (2021). URL: <https://www.hybritdevelopment.se/en/a-fossil-free-development/direct-reduction-hydrogen-pilotscale>.

15 Shatokha, V. (2018). Chasing shadows: Technology and socioeconomic barriers versus climate targets for iron and steel industry. *Archives of Materials Science and Engineering*, 92 (1), 33-40; DOI: 10.5604/01.3001.0012.5510.

16 de Villafranca, Casas M.J., Kuramochi, T., Hagemann, M., Hans, F., Tewari, R., Lütkehermöller, K., Höhne, N., (2018). Variable renewable energy policy impact forecast tool. *Draft, NewClimate – Institute for Climate Policy and Global Sustainability GmbH*, Berlin. URL: [https://newclimate.org/wp-content/uploads/2018/12/RE\\_PolicyTool\\_TechnicalDocumentatioDRAFT.pdf](https://newclimate.org/wp-content/uploads/2018/12/RE_PolicyTool_TechnicalDocumentatioDRAFT.pdf).

17 McGahan, A. M., (2000). How industries evolve. *Business Strategy Review*, 11, 1-16.

18 Шатоха, В. І. (2017). Лідерство Європейського Союзу у запобіганні зміні клімату: Монографія. Дніпро: Акцент ПП, (144).

19 World Steel Association. Fact sheet: Carbon capture and storage (CCS). URL: [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:9480b8a4-1ff8-4b46-80c7-0a78fcd2d04b/Carbon%2520Capture%2520Storage\\_vf.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:9480b8a4-1ff8-4b46-80c7-0a78fcd2d04b/Carbon%2520Capture%2520Storage_vf.pdf).

20 ArcelorMittal Europe sets target to cut carbon emissions by 30% by 2030, to contribute to the European Commission's Green Deal (2021). URL: [https://europe.arcelormittal.com/newsandmedia/europenews/4983/EU\\_GreenDeal](https://europe.arcelormittal.com/newsandmedia/europenews/4983/EU_GreenDeal).

21 World Energy Outlook 2018. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.

22 Укрінформ 2021. <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3260310-u-minfini-poasnili-ak-zminitsa-ekologicnij-podatok.html>.

## DECARBONIZATION PATHWAYS FOR THE STEEL INDUSTRY

Volodymyr Shatokha\*

**Keywords:** iron and steel sector, greenhouse gases emissions, development scenarios, technology transformation, carbon border adjustment.

**Research objectives.** This study aims to reveal plausible futures of the iron and steel sector based on reputed development scenarios in the global context. We also examine the threats of rolling out the carbon border adjustment mechanism by the European Union and related mitigation approaches from Ukrainian prospective.

**Methodology.** Trajectories of CO<sub>2</sub> emissions are modelled based on the analysis of plausible scenarios for technology transformation and global demand for steel towards 2050. The dynamics of the of the best available and innovative technologies' implementation was modelled using the S- curve estimated using a sigmoid function.

**Findings.** Existing scenarios for the development of global steel sector require a very significant technological transformation in steel production and consumption. Significant CO<sub>2</sub> emissions reduction is possible by: increasing the share of secondary steelmaking route; improving energy efficiency through the introduction of Best Available Technologies (BAT); increasing the share of production of direct reduced iron (DRI); introduction of innovative ironmaking technologies, deployment of carbon capture and storage/utilization (CCSU) technologies. The simulation reveals an eco-innovation gap after 2050 that can only be bridged through CCSU.

Ukraine's steel sector is not properly modernized, while there is a lack of sound scientific basis for choosing a climate-driven development strategy. Ukraine's steel sector is not properly modernized, while there is a lack of sound scientific basis for choosing a climate-driven development strategy. Excessive export orientation makes Ukraine's steel industry very vulnerable to the problems of the global economy. In particular, the application of the carbon border adjustment mechanism may pose a threat to competitiveness, which requires rapid modernization of the industry.

**Conclusions and Recommendations.** The performed analysis allows to conclude that the addressing of the climate targets requires additional efforts not only in the research and development domain. Convincing political decisions on financial support mechanisms for the development and implementation of innovative technologies, as well as for the transfer of best available technologies, is on demand and should ensure rapid technological transformation at all levels of metallurgical production, taking into account both short-term socio-economic challenges and long-term strategies.

---

\***Volodymyr Shatokha** – Dr. Prof. Ironmaking and Steelmaking Dept., Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine. E-mail: shatokha@metal.nmetau.edu.ua; <http://orcid.org/0000-0001-6024-0557>.

## РОЗДІЛ ІІІ

# ЕНЕРГЕТИЧНА СТАЛІСТЬ ЯК СКЛАДОВА ВІДПОВІДАЛЬНОГО СПОЖИВАННЯ І ВИРОБНИЦТВА

Нова енергетична стратегія України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» містить дії з реформування енергетичного комплексу на принципах сталого розвитку, що включають інноваційне оновлення моделей виробництва і споживання енергії, скорочення викидів парникових газів, досягнення енергетичної безпеки та енергоефективності в усіх галузях економічної діяльності. В Україні склалися унікальні можливості, щоб завдяки енергетичним реформам здійснити прорив в економічному та соціальному розвитку.

Загарбницька війна РФ проти України змусила нас відкласти амбіційні плани на майбутнє. Ворог робить все, щоб знищити маневрову генерацію в країні. В складній ситуації сьогодні опинилися усі сектори енерголанцюга, знищено значний обсяг теплової та гідрогенерації, руйнуються електричні мережі, розкрадається обладнання станцій, під обстріли потрапили понад тисячі об'єктів «зеленої» генерації.

Проте непорушне прагнення до збереження незалежності і набуття європейського майбутнього надають нам рішучості вже зараз готуватися до післявоєнної побудови абсолютно нової енергетичної системи і просувати відданість цілі «Забезпечення доступу до недорогих, надійних, стійких та сучасних джерел енергії для всіх» в усіх галузях економічної діяльності, спираючись на концепцію «зеленого» енергетичного переходу в рамках Європейського Зеленого Курсу.

Враховуючи багатогранність енергетичної тематики, пропонується дискусія стосовно трьох основних викликів для України: макропитань на шляху до впровадження цілей «озеленення» енергетичного балансу України, формування нового типу енергоменеджменту у промисловості, можливості вирішення технічних проблем легкових електромобілів для збільшення їх ринкової привабливості.

*Глава восьма* аналізує питання, що стосуються введення в експлуатацію генеруючих потужностей з відновлюваних джерел енергії в контексті виконання запланованих реформ у галузі енергетики; розглядає можливі системи регулювання електричної енергії, принципи їх роботи та пропозиції щодо вибору найбільш технологічно перспективних систем для умов України. *Дев'ята глава* обговорює проблему підвищення показників енергоефективності у контексті трилеми енергетичної сталості, вивчає досвід країн-членів ЄС та результати масштабних проектів з впровадження стандартів енергоменеджменту в українському промисловому секторі, що підтримувалися UNIDO/GEF. *Десята глава* концентрує увагу на покращенні енергетичних показників та параметрів електромагнітної сумісності перетворювачів зарядних станцій електромобілів з живлячою мережею шляхом використання активних випрямлячів з корекцією коефіцієнта потужності.

## ГЛАВА 8

# ПРОБЛЕМИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

Дмитро Ципленков, Олексій Бобров\*

**Анотація.** В главі аналізуються питання сталого розвитку електроенергетики України за умов введення в експлуатацію генеруючих потужностей з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Доводиться, що, за умов виконання запланованих реформ, протягом найближчих 10 років країна може вийти на показники до 25% електричної енергії, виробленої з ВДЕ. Але у зв'язку з фізичною обмеженістю функціонування ВДЕ постає гостра необхідність в регуляторах електричної потужності для їх підключення до енергосистеми України. Розглядаються можливі системи регулювання електричної енергії, принципи їх роботи та пропозиції щодо вибору найбільш технологічно перспективних систем для умов України.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, енергосистема України, воднева енергетика, генеруючі потужності, системи акумулювання, електрична енергія.

### 8.1 Вступ

*Постановка проблеми.* Надійне, економічно обґрунтоване й екологічно безпечне задоволення потреб населення й економіки в енергетичних продуктах є пріоритетним завданням енергетичної політики держави. До того, за висновками ОЕСД, Україна є ключовим партнером у транзиті первинних джерел енергії і водночас має один із найбільших потенціалів з видобутку вуглеводнів у Європі. Тому реформа енергетичного сектору на принципах третього енергетичного пакету залишається важливим фактором прискорення інтеграції в ЄС [1].

Розпад Радянського Союзу в 1991 році спричинив значну політичну й економічну нестабільність, яка відбилася на енергетичному секторі України – за останні 20 років загальне постачання первинної енергії зменшилося на більш ніж 45%, країна стійко посідає перші ланки у світовому рейтингу за енергоеємністю ВВП [2].

---

\*Ципленков Дмитро Володимирович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри електротехніки, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, E-mail: Tsyplenkov.d.v@nmti.one, <https://orcid.org/0000-0002-0378-5400>. Бобров Олексій Володимирович – канд. техн. наук, викладач спеціальних та електротехнічних дисциплін Фахового коледжу ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету ім. О. Гончара (за сум. доцент кафедри електротехніки, НТУ «Дніпровська політехніка»), м. Дніпро, Україна, E-mail: Bobrov.o.v@nmti.one, <https://orcid.org/0000-0002-1872-8900>.



Відсутність реформ, висока монополізація енергетичного сектору та дешевий російських газ зробили Україну однією з найменш енергоефективних країн серед держав-членів Енергетичного Співтовариства. За статистикою МЕА (*англ.* International Energy Agency, IEA), незважаючи на покращення показників енергоефективності на початок 2022 року, споживання енергії на одиницю ВВП в Україні залишалося у три рази більшим за середнє у світі [3-4]. Збройна окупація рф у 2014 році Кримського півострову та територій на сході України розірвали ланцюг постачання енергії в Україні, оскільки основна частка вуглевидобувних шахт Донецьку та Луганську були захоплені ворогом<sup>1</sup>.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Уклавши Угоду про асоціацію з Європейським Союзом, Україна прийняла історичне рішення щодо пріоритетів свого розвитку. Ключовими завданнями Енергетичної стратегії на період до 2030 року [5] визначено формування надійної системи забезпечення енергетичної безпеки країни, гарантування стабільного енергозабезпечення національної економіки і суспільних потреб в режимах як звичайного, так і особливого стану.

В численних публікаціях досліджуються фактори, що разом призвели до вкрай критичного стану енергетичної галузі сьогодні. Доводиться, що основними з них є радянська спадщина щодо екстенсивних методів державного управління розвитком країни. Спрацювання технічного потенціалу і моральний знос більшості генеруючих потужностей та обладнання електромереж, незбалансована зовнішня енергетична політика, невдалі та хаотичні експерименти з пільгами у галузі «зеленої» енергетики, короткозорі рішення щодо реформування ринку електроенергії, через все це напередодні війни уряд фактично втратив контроль над галуззю і не мав однозначного розуміння того, як вибратися з критичного становища [6-7].

Також вчені підкреслюють, що необхідні перетворення потребують не тільки великих інвестицій (за оцінками Держенергоефективності України близько 30 млрд євро), але й термінового впровадження технічних і нормативних інструментів по створенню сприятливих умов для участі всіх категорій виробників і споживачів у балансуванні та поліпшенні якості ринку електроенергії [8-9].

Але сьогодні енергетична галузь України переживає найскладніший період у своїй історії через повномасштабне вторгнення армії божевільного російського диктатора. Вже два роки українська енергосистема працює під ракетними ударами рф, але об'єднавшись з європейською енергомережою.

---

<sup>1</sup>*Ред.* Попри численні факти участі російських збройних сил у війні на сході України та докази причетності до агресії проголошення «державних суверенітетів» ДНР і ЛНР, офіційно рф не визнавала факту свого вторгнення в Україну, тому український уряд до 24 лютого 2022 року розглядав війну на Донбасі як неоголошену або «гібридну» війну рф проти України. Див.: <http://ua.112.ua/suspilstvo/poroshenko-ninishnya-neogoloshena-viyna-mozhe-stati-velikoyu-vitchiznyanoyu-dlya-ukrayinciv-105941.html>.

Країна отримала масштабне пошкодження та руйнування через масовані артобстріли росіянами об'єктів критичної інфраструктури паливно-енергетичного сектору. Збройні сили кривавої росії ще на початку війни змогли захопити Запорізьку атомну станцію та вломилися до Чорнобильської АЕС<sup>2</sup>. На жаль, обсяг збитків і втрат у галузі зростатимуть, оскільки жорстке протистояння триває<sup>3</sup>.

Проте дії з озеленення національної енергетики не зупиняються. МЕА стверджує, що для виходу на енергетичну самодостатність Україні необхідно реалізувати три напрями: 1) негайне відновлення пошкоджених або зруйнованих газодобувних споруд для обмеження залежності від імпорту газу в короткостроковій перспективі; 2) подальший розвиток комбінованого виробництва електричної та теплової енергії; просування енергоефективності муніципальної енергетичної системи; 3) подальший розвиток децентралізованої генерації електроенергії на основі відновлюваних джерел енергії, зокрема вітроенергетики, біогазу і використання відходів [4].

За висновками експертів МЕА, у середньостроковій перспективі скорочення споживання газу стане основним важелем утвердження енергетичної незалежності України в рамках післявоєнного відновлення. Україна потенційно здатна виробляти з відновлюваних джерел не менше 74% від потрібної країні енергії, тоді як у кращий 2021 рік цей рівень становить лише 6%, що в рази менше, ніж в країнах ЄС. Так, МЕА оцінює можливості зростання вітроенергетики на 49%, біоенергетики – 22%, великої гідроенергетики – 17% і малої – 7%, а також сонячної енергетики – 5%.

Експертні рекомендації МЕА передусім базуються на використанні інноваційних технологій, що сприяють зниженню енергоємності виробництва. До таких заходів належать поширення використання котлів циркулюючого киплячого шару, перетворення котелень на когенераційні міні-ТЕЦ, впровадження газотурбінних технологій для базового, пікового і напівпікового навантаження та ін.

---

<sup>2</sup>Ред. За оцінками експертів Київської школи економіки, прямі збитки енергетичного сектору України станом на травень 2024 року складають понад \$16,1 млрд. Під час війни було окуповано понад 18 ГВт електрогенеруючих потужностей, повністю зруйновані Каховська та Дніпровська ГЕС, а також Зміївська та Трипільська ТЕС. Критичних пошкоджень (понад 80%) зазнали приватні теплоелектростанції, пошкоджено близько половини високовольтних підстанцій передачі електроенергії (див.: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zbitki-ta-vtrati-energetichnogo-sektoru-ukrayini-vnaslidok-povnomasshtabnogo-vtorgnennya-rosiyi-perevishhili-56-mlrd-otsinka-kse-institute-stanom-na-traven-2024-roku/>).

<sup>3</sup>Ред. Але світ об'єднався і готовий допомагати Україні – низка міжнародних фінансових інститутів (зокрема МВФ, Світовий банк, ЄБРР, Європейський інвестиційний банк, Банк розвитку Ради Європи та ін.) підписали грантові угоди за різними проектами підтримки, відновлення, відбудови та реформування України. Так, Виконавча рада Міжнародного валютного фонду (МВФ) 28 червня 2024 року завершила четвертий перегляд програми в рамках Механізму розширеного фінансування для України (Extended Fund Facility, EFF) і відкриває шлях до отримання траншу фінансування EFF обсягом близько 2,2 млрд дол. США (див.: <https://niss.gov.ua/news/komentari-ekspertiv/dopomoha-mizhnarodnykh-finansovykh-institutiv-ukrayini-cherven-2024-Hxeo1FyEY2X8G61duU8-1724874014-0.0.1.1-6271>).

Підкреслюється, що найбільший потенціал економії енергії в Україні зосереджено в малій енергетиці, зокрема в промислових ТЕЦ і в котельних, інших малих енергоустановках, що споживають понад 60 % усього палива в країні. Слід ширше використовувати місцеві енергоресурси, великий потенціал має застосування частини «нічного провалу» з метою електроопалення.

*Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.* Аналізуючи інформацію з офіційних джерел можна бачити, що першочерговим післявоєнним завданням української енергетики є збереження довоєнних темпів введення в експлуатацію генеруючих потужностей з ВДЕ та збільшення частки «зеленої» енергії до 25% виробництва електричної енергії в країні. У зв'язку з тим загострюється технічна проблема щодо установки і підключення систем ВДЕ до енергосистеми України. Оскільки за своєю природою ВДЕ функціонує періодично, потрібні потужні регулятори електричної енергії. Проблема наразі є новою і малодослідженою.

*Метою цього дослідження* є обґрунтування потужності регуляторів електричної енергії в енергосистемі України, з урахуванням прискореного зростання підключених генеруючих потужностей на основі ВДЕ<sup>4</sup>.

*Методика дослідження* включає використання емпіричних методів спостереження, які дозволяють реалістично відобразити сукупні характеристики добових графіків генерації об'єднаної енергосистеми України (або ОЕС) та індукції на підставі погодинного аналізу її характерних добових графіків.

---

<sup>4</sup>Ред. Мета дослідження, представленого авторами, є особливо актуальною у світі завдань нового Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України» від 30.06.2023, який спрямовано на вирішення широкого спектру проблем у галузі альтернативної енергетики України. Основні нововведення базуються на імплементації положень базових Директив ЄС, а саме: 1) Система видачі гарантій походження електричної енергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії. Закон впроваджує механізм видачі, використання та припинення дії гарантій походження, що закріплені в Директиві Європейського Парламенту та Ради 2018/2021 від 11.12.2018 і є обов'язковим до імплементації в Україні. 2) Механізм ринкової премії або контракти на різницю, що теж передбачений Директивою Європейського Парламенту та Ради 2018/2021 від 11.12.2018 і є обов'язковим до імплементації в Україні. 3) Вихід суб'єктів господарювання з балансуєної групи Гарантованого покупця. Вводиться норма, що при повторному включенні дія договору купівлі-продажу електричної енергії за «зеленим» тарифом поновлюється, чого раніше не було. 4) Можливість експорту електричної енергії виробниками та Гарантованим покупцем. Виробники електричної енергії з альтернативних джерел енергії тепер мають право продавати електричну енергію за двосторонніми договорами за цінами, що склалися на відповідних ринках, та за договорами експорту-імпорту електричної енергії або за «зеленим» тарифом. 5) Можливість завершення будівництва та введення в експлуатацію до кінця 2023 року об'єктів для вироблення електричної енергії за «зеленим» тарифом (крім енергії сонячного випромінювання) – можливість добудувати та ввести в експлуатацію потужності з ВЕД надається суб'єктам, які уклали договори купівлі-продажу електричної енергії за «зеленим» тарифом ще до 31 грудня 2019 року.

## 8.2 Стан та проблематика розвитку електроенергетики України

За даними Міненерго України за I півріччя 2021 року, виробництво електричної енергії електростанціями України склало 77735,1 млн кВт·год, що на 4303,1 млн кВт·год, або на 5,9% більше, ніж за відповідний період 2020 року. При тому основна частка отриманого обсягу виробництва за цей період припадає на АЕС – 54,0%, ТЕС та ТЕЦ – 29,6%, а також ГЕС та ГАЕС – 8,0% [2]. З табл. 8.1 можна бачити, що структура джерел виробництва, зокрема частка ВДЕ, суттєво не змінилася.

**Таблиця 8.1** – Структура виробництва електроенергії у I півріччі 2021 року  
(Джерело: розроблено авторами на підставі даних Укрстату [8])

Вироблено електроенергії	2020 рік		2021 рік		Відносно до 2020	
	млн кВт·год	%	млн кВт·год	%	млн кВт·год	%
Всього	73432,0	100,0	77735,1	100,0	4303,1	5,9
ТЕС та ТЕЦ, з них:	24132,9	32,9	23011,6	29,6	-1121,3	-4,6
ТЕС ГК	17579,7	23,9	17433,1	22,4	-146,6	-0,8
ТЕЦ та когенераційні установки	6553,2	8,9	5578,5	7,2	-974,7	-14,9
ГЕС та ГАЕС, з них:	3606,4	4,9	6198,0	8,0	2591,6	71,9
ГЕС	2865,5	3,9	5630,9	7,2	2765,4	96,5
ГАЕС	740,9	1,0	567,1	0,7	-173,8	-23,5
АЕС	39389,1	53,6	42004,9	54,0	2615,8	6,6
ВДЕ	5356,2	6,6	5654,7	6,7	298,5	5,6
Блок-станції	947,4	1,3	865,9	1,1	-81,5	-8,6

Аналіз фактичного балансу електроенергії ОЕС України у червні 2021 року свідчить, що запланований обсяг виробництва електричної енергії в основному забезпечено АЕС та електростанціями, які входять до ОЕС України. Суттєво збільшилися обсяги виробництва ГЕС та АЕС, проте альтернативна енергетика знову зменшила темпи приросту (див. табл. 8.2).

На рис. 8.1 наведено структура джерел виробництва енергії в Україні за двадцять років. Як бачимо, частка ВДЕ взагалі зростає дуже повільно – у 2020 році досягла тільки 6,6%, хоча планувалося не менше 11% «зеленої» енергії в кінцевому енергоспоживанні. В цей же рік в ЄС з відновлюваних джерел було згенеровано 38% всієї електроенергії (вперше в історії перевищила частку викопного палива – 37%). П'ята частина електроенергії ЄС надійшла з вітряних і сонячних систем. Найвищі показники вироблення вітрової та сонячної енергії зафіксовані в Данії (61%), Ірландії (35%), Німеччини (33%) та Іспанії (29%)<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>Ред. Див.: <https://mind.ua/news/20221272-u-2020-roci-v-evropi-vpershe-virobili-bilshe-energiyi-z-vidnovlyuvalnih-dzherel-anizh-vikopnih>

Таблиця 8.2 – Фактичний баланс електроенергії ОЕС України у червні 2021 року (Джерело: розроблено на підставі даних Укрстату [8])

Показники	Прогноз	Факт	Відхилення, +/-	
	млн кВт·г			%
1. Виробництво електроенергії в тому числі:	11 599,0	11 324,0	-275,0	-2,4
1.1. ТЕС	2 848,0	2 315,0	-533,0	-18,7
1.2 ТЕЦ та когенераційні установки	631,0	280,0	-351,0	-55,6
1.3 ГЕС	821,0	1 200,0	379,0	46,2
1.4 ГАЕС	143,0	83,0	-60,0	-42,0
1.5 АЕС	5 886,0	6 204,0	318,0	5,4
1.6 Блок-станції	140,0	174,0	34,0	24,3
1.7 Альтернативні джерела	1 130,0	1 068,0	-62,0	-5,5
2 Імпорт електроенергії	84,0	4,0	-80,0	-95,2
3 Експорт електроенергії	485,0	336,0	-149,0	-30,7
4 Технологічний переток електроенергії, зумовлений паралельною роботою з енергосистемами суміжних країн	0	-22	-22,0	-
5 Електроспоживання (брутто)	11 000,0	10 970,0	-30,0	-0,3
6 Споживання електроенергії ГАЕС в насосному режимі	198,0	112,0	-86,0	-43,4

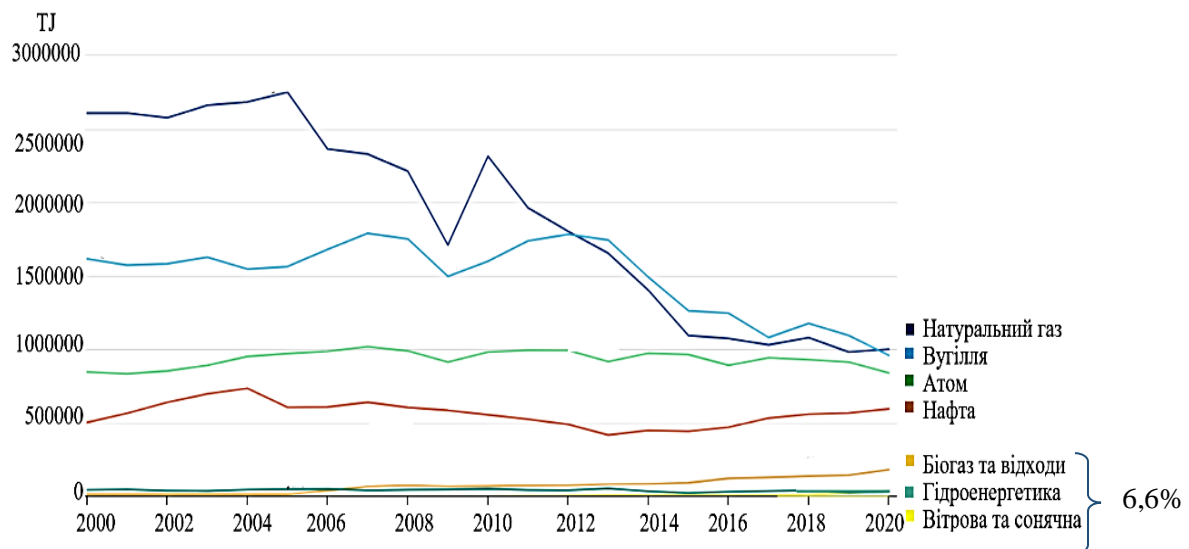


Рисунок 8.1 – Динаміка виробництва електроенергії в Україні (Джерело: МЕА [4])

Розглянемо динаміку введення в експлуатацію нових генеруючих потужностей на основі ВДЕ в Україні та проведемо аналіз таких систем з точки зору визначення лідируючих позицій. Для аналізу взято 2019 рік, який є найбільш успішний для української відновлювальної енергетики [9-10].

Статистика свідчить, що у другому кварталі 2019 на території України було введено в експлуатацію об'єкти відновлюваної енергетики загальною потужністю 656 МВт, що в 6 разів вище у порівнянні з аналогічним періодом минулого року (у II кварталі 2018 введено 109,6 МВт). Таким чином, на момент кінця другого кварталу потужність сектора ВДЕ в Україні досягла позначки в 3 634,4 МВт (див. рис. 8.2).

У квітні - липні 2019 року введення в експлуатацію кожного окремого виду ВДЕ виглядало наступним чином:

- СЕС: + 568,3 МВт потужностей (у 5,5 разів більше ніж у аналогічному періоді минулого року);
- ВЕС: + 71 МВт (більше у 22 рази);
- Біогаз: + 15,9 МВт станцій на (більше у 53 рази);
- Малі ГЕС: + 0,8 МВт.

Варто зазначити, що середня одинична потужність введених в експлуатацію об'єктів ВДЕ складала 6,4 МВт. Як бачимо з рис. 8.2, у структурі введення в експлуатацію потужностей за областями лідерами є: Запорізька область – 152 МВт, Миколаївська область – 132 МВт та Київська область – 76,3 МВт.

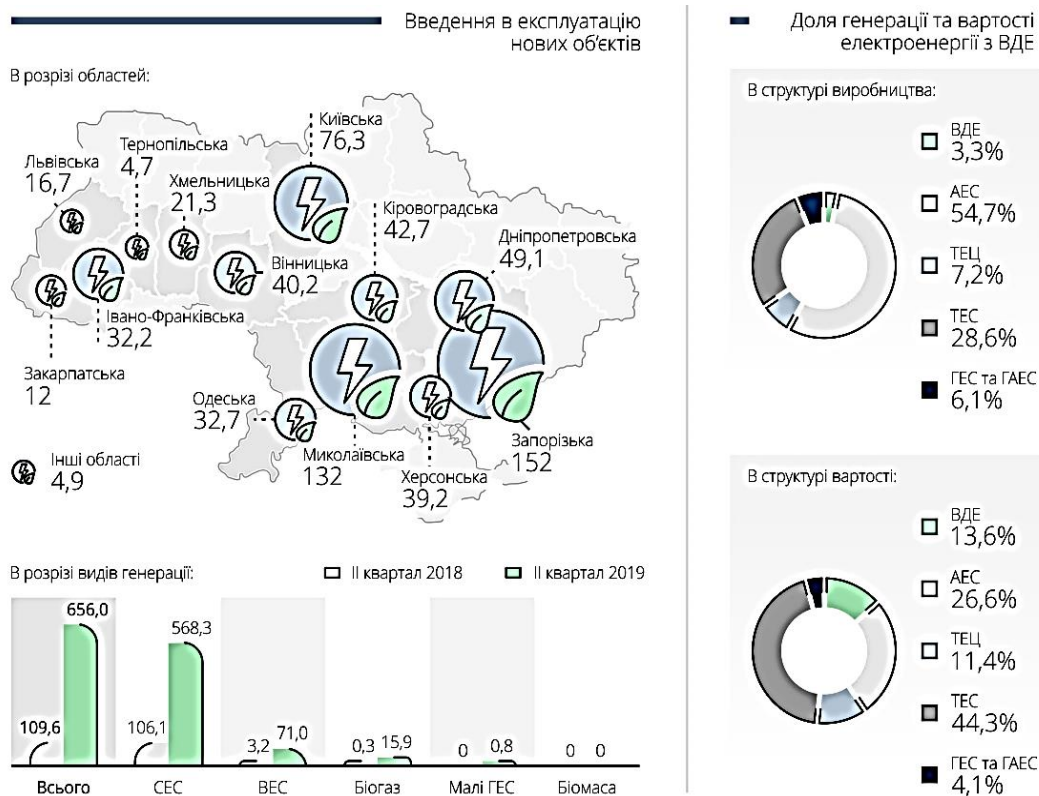
Загалом, за перше півріччя 2019 року в Україні запустили об'єкти ВДЕ, сумарна потужність яких складає 1 517,1 МВт. З них СЕС – 1 252,1 МВт, ВЕС – 243,7 МВт, станції на біогазі – 20,4 МВт та малі гідроелектростанції – 0,9 МВт [10]. Далі, за даними Національної комісії, що здійснює регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), за результатами III кварталу 2019 року, структура генерації електроенергії в Україні виглядає наступним чином [9]: АЕС – 53,7%; ГЕС – 30,8%; ТЕЦ – 6,8%; ГЕС та ГАЕС – 4,9%; ВДЕ – 3,7%. У свою чергу, серед відновлювальних джерел енергії на ВЕС та СЕС прийшло близько 90% генерації електричної енергії, відповідно 30% та 60%. Решту – 10% розподіляють малі ГЕС (5%) та генерація з біогазу/біомаси (5%) [10] (див. рис. 8.3).

В НКРЕКП відмічають, що протягом III кварталу було введено 955,5 МВт нових генеруючих потужностей, з яких 97,8% складають ВЕС та СЕС. Найбільше об'єктів було побудовано в Дніпропетровській області – 388,5 МВт, за нею йдуть Запорізька область – 166,9 МВт та Миколаївська область – 144,2 МВт. Загальна встановлена потужність об'єктів ВДЕ у 2019 році складає 4 591,1 МВт, що більш ніж у 2 рази більше, ніж на кінець 2018 року<sup>6</sup>.

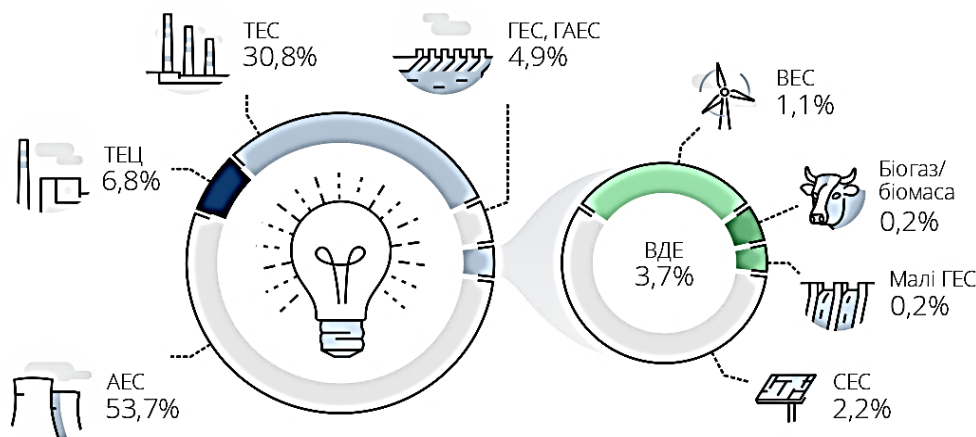
---

<sup>6</sup>Див.: <https://www.nerc.gov.ua/>.





**Рисунок 8.2** – Динаміка розвитку сектора ВДЕ, МВт – за II кварталі 2019 року ( Джерело: побудовано [10] за даними НКРЕКП)



**Рисунок 8.3** – Частка ВДЕ в виробництві електричної енергії, % – за III квартал 2019 року ( Джерело: побудовано з використанням [10] за даними Міністерства енергетики та вугільної промисловості)

Цікавими є показники у травні 2019 року (див. рис. 8.4). Як бачимо, українськими об'єктами альтернативної генерації було сумарно відпущено у ринок 468,5 тис. МВт·год електроенергії, що у порівнянні з минулим місяцем – квітнем зростає на 109,1 тис. МВт·год (тобто на 30,3%). За підсумком травня частка ВДЕ в загальному відпуску електроенергії в ОРЕ склала 4,43%.

Структура генерації електроенергії у розрізі напрямів ВДЕ виглядала наступним чином:

- Сонячна генерація – 275,6 тис. МВт·год (58,8% у загальній структурі);
- Вітрова генерація – 126,6 тис. МВт·год (27%);
- Гідроелектростанції – 33,2 тис. МВт·год (7,1%);
- Об'єкти на біогазі – 16,7 тис. МВт·год (3,6%);
- Об'єкти на біомасі – 16,1 тис. МВт·год (3,5%).

З вище викладеного можна зробити висновок про те, що системи генерації електроенергії на основі ВДЕ впроваджуються дуже великими темпами і займають все більшу частину ринку. А серед таких систем домінують сонячні електростанції.

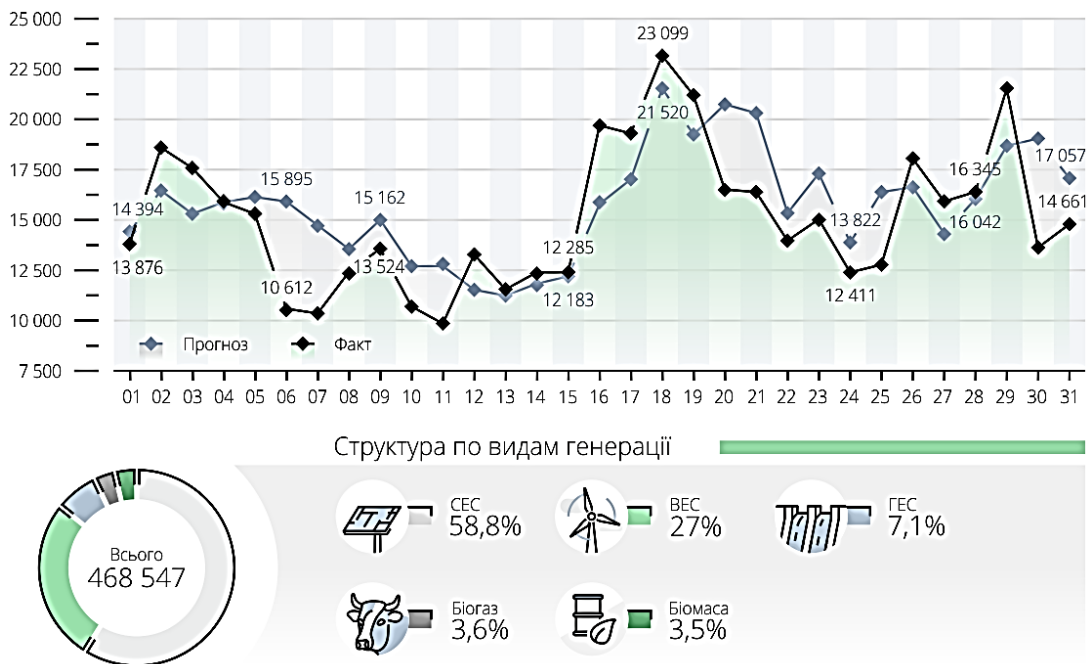
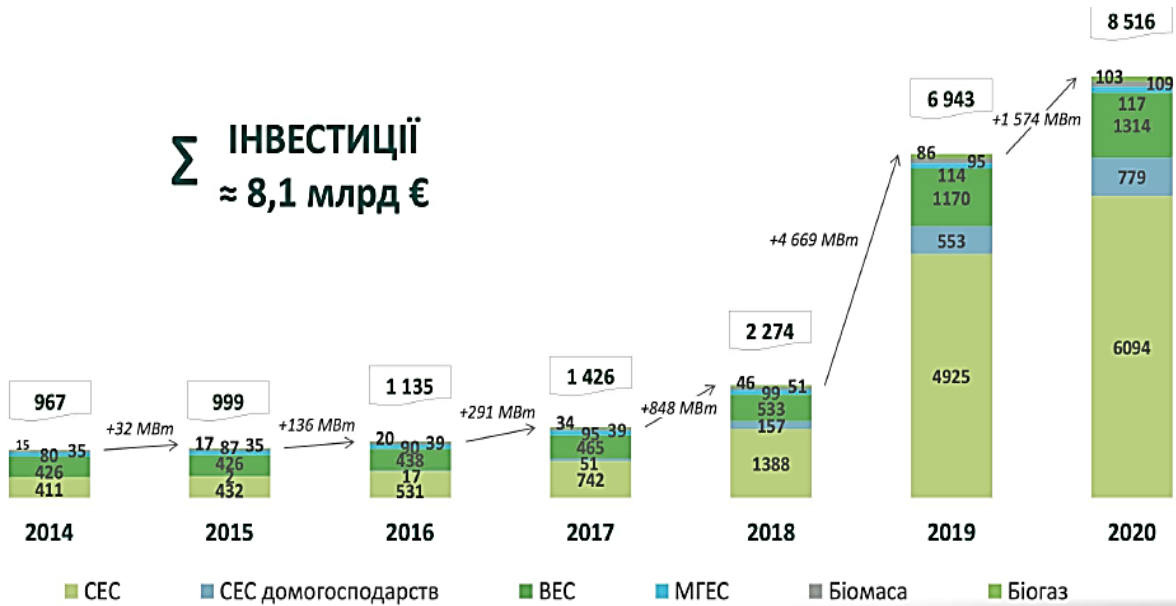


Рисунок 8.4 – Структура генерації електричної енергії ВДЕ, МВт·год – за травень 2019 р. (Джерело: [10] за даними енергоринку)

За даними «Держенергоефективності» [11], всього за 2020 рік було інвестовано більше 8 млрд євро у понад 8500 МВт нових потужностей відновлюваної електроенергетики, введених в Україні (див. рис. 8.5).



**Рисунок 8.5** – Динаміка зростання встановленої потужності та виробництва електроенергії з ВДЕ, що працюють за «зеленим» тарифом, станом на 02.02.2021  
(Джерело: Держенергоефективності [11])

Отже, підсумовуючи і аналізуючи інформацію з офіційних джерел, можна зробити висновок, що введення в експлуатацію генеруючих потужностей з ВДЕ буде зростати і може зайняти близько 30% ринку виробки електричної енергії. Тому, враховуючи особливості функціонування систем ВДЕ, а саме – періодичність, необхідно передбачити установку і підключення до енергосистеми України регуляторів електричної потужності. Далі, розглянемо потужні системи регулювання електричної енергії, принципи їх роботи та зробимо вибір найбільш технологічно перспективних систем для умов України.

### 8.3 Принципи роботи та застосування регуляторів електричних навантажень

Відомо, що значна добова і тижнева нерівномірність електроспоживання чинить негативний вплив на показники роботи єдиної енергетичної системи (ЄЕС): погіршення кінцевих результатів діяльності через зниження числа годин використання встановленої потужності; прискорення зносу обладнання внаслідок збільшення питомих витрат палива за рахунок нерівномірного режиму роботи обладнання; зниження ефективності теплофікації за рахунок прямого редукування гострого пара; погіршення якості електричної і теплової енергії, що відпускається споживачам і т. п.

Для підвищення економічної ефективності енергетичного господарства розробляють навмисно зміну конфігурації графіків електричних навантажень ЄЕС. Зниження максимуму і підвищення мінімуму навантаження прийнято називати регулюванням (вирівнюванням) графіків навантаження. Регулювання графіків електричних навантажень дозволяє ліквідувати ряд недоліків, викладених вище, а також знизити робочу потужність ЄЕС і, отже, капітальні вкладення в розвиток енергетичних потужностей. Методи регулювання можуть бути централізовані і місцеві, що здійснюються в розрізі доби, тижні, сезони року (сезонне регулювання).

Розглянемо основні централізовані методи регулювання:

- *Перший метод* спрямований на зменшення сумарного вечірнього максимуму навантаження за рахунок зсуву максимумів технологічного та освітлювального навантажень. Прикладом цього методу може служити переведення годинникової стрілки на одну годину вперед в порівнянні з астрономічним часом.

- *Другий метод* пов'язаний з переносом початку і кінця роботи окремих груп промислових підприємств. Це дозволяє заповнювати провали графіка і знижувати сполучений максимум навантаження.

- *Третій метод* полягає у впровадженні гідроакумулюючих, пневмоакумулюючих, електроакумулюючих і водневих електростанцій. Ці електростанції виконують дві функції: як споживачів беруть участь в регулюванні графіків; в якості джерел генерації покривають піки навантаження.

- *Четвертий метод* – регулювання графіків навантаження за допомогою споживачів-регуляторів. Сутність цього методу полягає в залученні таких споживачів, які можуть знижувати своє навантаження або працювати з перервами, коли це необхідно за балансом потужності або енергії ЄЕС. У зв'язку з цим споживачі-регулятори повинні володіти рядом особливостей, що відрізняють їх від звичайних споживачів. До них слід віднести: порівняно незначні капітальні витрати; максимальну автоматизацію технологічних процесів з метою зниження чисельності персоналу до мінімуму; швидка зміна режиму роботи; високу електроємність. Використання споживачів-регуляторів дозволяє переносити частину резерву ЄЕС з генеруючої частини, в частину що споживає.

До інших централізованих методів регулювання слід віднести: зміну загальнозавантажених вихідних днів для деяких груп споживачів; залучення додаткового контингенту споживачів на години доби, в яких є надлишок невикористаної потужності.

Розглянемо фізичну модель оптимального завантаження устаткування в добовому режимі на прикладі енергосистеми з гідроакумулюючою електростанцією (ГАЕС), що працює в режимі акумулювання потенційної енергії води – закачується в верхнє водосховище.

У години максимуму електричних навантажень потенційна енергія вміщена в верхнє водосховище води використовується для виробництва пікової електроенергії в оборотному насосі-гідротурбині. Така модель роботи притаманна й іншим типам споживачів-регуляторів. На добовому графіку електричних навантажень (див. рис. 8.6) зона поза пікового електроспоживання розташована нижче лінії АВ, і в точках С і С' виникає необхідність або розвантаження обладнання діючих електростанцій, або здійснення насосного режиму ГАЕС з включенням в роботу насосів для закачування води в верхнє водосховище.

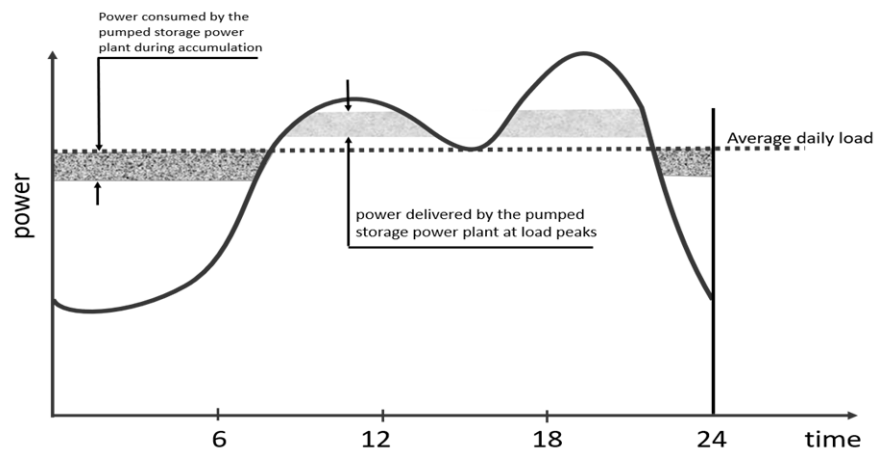
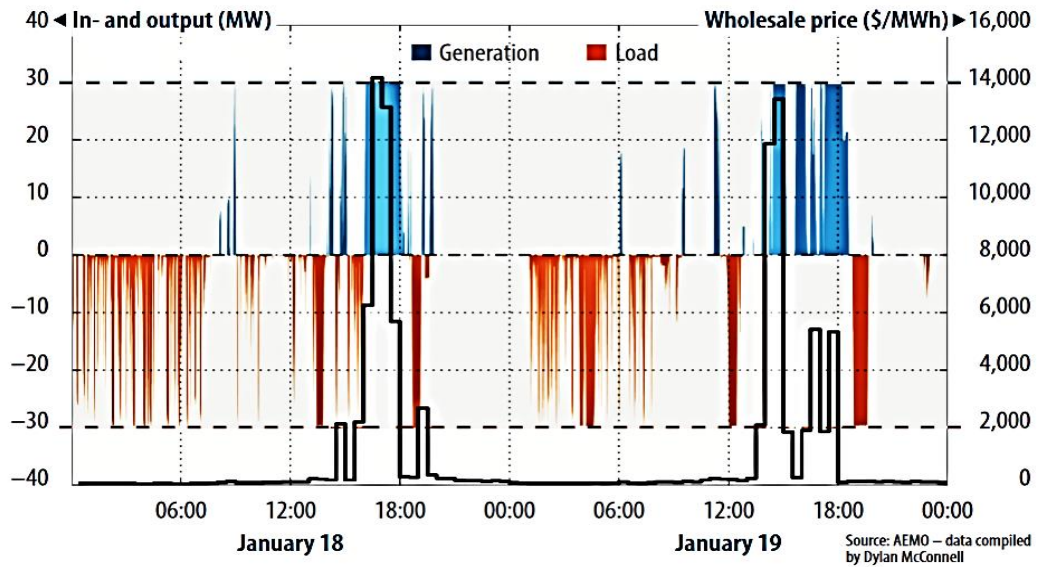


Рисунок 8.6 – Добовий графік електричних навантажень  
(Джерело: [12])

Для пневмоакумулюючих, електроакумулюючих і водневих електростанцій принцип роботи є аналогічним. Розглянемо більш детально деякі системи регулювання електричних навантажень.

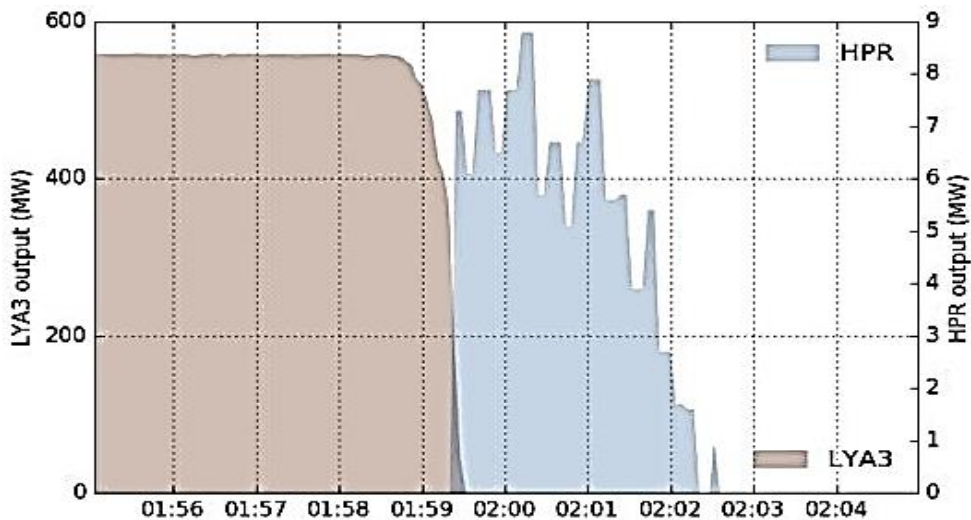
*Електроакумулюючі системи.* Найбільш відома система на акумуляторних батареях належить компанії Neoen (Австралія). З такою ємністю акумуляторів зараз Hornsdale Power Reserve – найбільша в світі акумуляторна установка. Це у своєму роді демонстраційний проект – компанія Tesla вважала за потрібне показати всім на ринку, що майбутнє є саме за акумуляторними сховищами в енергосистемі. Вони згладжують скачки потужності, що виникають при генерації у повітряних і сонячних електростанцій, акумулюючи енергію під час максимальної генерації і під час низької ціни на оптовому ринку – та подаючи її в систему, коли спостерігається максимальне енергоспоживання і максимальна ціна на електрику.

На графіку нижче (див. рис. 8.7) за 18-19 січня 2018 року добре видно, як система акумулює дешеву енергію, а потім продає її в кілька разів дорожче в пікові години. Саме в ці два дні установка принесла компанії Neoen максимальний прибуток.



**Рисунок 8.7** – Графік завантаження Hornsdale Power Reserve, 18-19 січня 2018 року (Джерело: [13])

Крім того, станція оперативно реагує на різкі зміни в електромережі, наприклад – коли з технічних причин від загальної мережі раптово відключилася вугільна електростанція Loy Yang A 3. Станція зреагувала на цю подію протягом мілісекунд – на 4 секунди швидше, ніж резервний генератор частотної контролю і допоміжних послуг [14] (див. рис. 8.8). На повну потужність з 0 до 100 МВт станція виходить за 140 мілісекунд.



**Рисунок 8.8** – Графік включення резервної потужності (Джерело: [14])



Ключова перевага акумуляторної системи перед іншими електростанціями – здатність миттєво вмикатися і вимикатися, реагуючи на зміни ціни на оптовому ринку. Фактично, станція працює не тільки як акумулятор і генератор частотного контролю, а й як просунутий торговий бот, алгоритми якого розроблені для отримання максимального прибутку на ринку.

Цим пояснюється і відносно невисока потужність станції. Одне з її завдань – миттєво включатися на кілька хвилин в ті моменти, коли в мережі відбувається якийсь стрибок, а ціна на електричну енергію різко піднімається вище норми. Крім миттєвого ввімкнення / вимикання, інші переваги таких акумуляторних систем – це модульність (потужність легко нарощується в разі необхідності) і швидкість будівництва. Але є і недоліки: станція працює тільки кілька хвилин і невідомо, скільки циклів заряду / розряду витримають батареї, перш ніж їх доведеться змінювати.

*Воднево акумуляуючі електростанції.* Зазвичай водневе акумуляування енергії розглядається у вигляді ланцюга, що зв'язує первинне джерело енергії, виробництво водню, систему зберігання водню і водневу енергоустановку.

Щодо застосування з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ) цей ланцюг зводиться як правило до отримання водню шляхом електролізу, зберігання водню в стислому або твердофазному пов'язаному вигляді і отримання електричної енергії з використанням електрохімічних генераторів (паливних елементів) або водньоспалюючих установок (включаючи двигуни внутрішнього згорання). Подібна система розглядається в якості буфера між електричною мережею і ВДЕ і призначена не тільки для довготривалого зберігання енергії, а й для згладжування суттєвих пульсацій, пов'язаних зі змінним характером ВДЕ. Водень можна зберігати або в чистому вигляді, або у вигляді хімічних сполук з високим вмістом водню, з яких, при необхідності, він може бути легко одержаний безпосередньо на борту транспортного засобу в одному з наступних процесів:

Використовують наступну зміну параметрів або агрегатного стану водню:

- стиснення газу або комбінований процес стиснення і охолодження;
- зрідження водню.

Водень, що володіє низькою критичною температурою, необхідно охолоджувати до температури нижче 20 К, щоб зберігати його в рідкому стані в посудинах без надлишкового тиску.

Сполука водню з іншими речовинами:

- адсорбція газоподібного водню деяким відповідним адсорбентом, наприклад, активованим вугіллям;
- утворення сполук з високим вмістом водню.

Такими сполуками можуть бути:

- з'єднання з сильним водневим зв'язком, що вимагають реалізації щодо складних хімічних процесів для отримання водню – наприклад, метанол, етанол, аміак, а також воду, яку можна розглядати як «носії» водню;

- з'єднання, які можуть бути перетворені в інші речовини з більш високим (або низьким) вмістом водню;

- гідриди металів, тобто з'єднання «метал» - «водень», що володіють властивістю оборотно абсорбувати і десорбувати водень при зміні температури.

Характеристики первинних джерел енергії та графіків споживання надають істотний вплив на основні технічні та економічні характеристики як окремих агрегатів, так і системи акумулювання. Серед інших технологій зберігання енергії водневе акумулювання відрізняється відносно низьким ККД (40...60%), однак цей недолік компенсується перевагами водневих систем, зокрема можливість тривалого зберігання енергії без втрат, що недосяжно для хімічних джерел струму, висока щільність зберігання енергії і малі капітальні витрати в порівнянні з ГАЕС і ПАЕС [15]. Зокрема, при добовому зберіганні водню в металлогідридній системі і виробництві електроенергії для кінцевого споживача з використанням ТПТЕ частина вартості електроенергії, пов'язана із зберіганням водню, становить близько 1,2 цента США/кВт·год, а при зберіганні водню протягом 30 діб – 12 центів США/кВт·год. Повна вартість пікової електроенергії в залежності від режимів і методів зберігання і споживання водню змінюється від 19 до 60 центів США за кВт·год.

Традиційно водень зберігається в стислому вигляді, в даний час розроблені і комерціалізовані системи зберігання з тиском понад 70 МПа. Низький тиск одержуваного водню призводить до необхідності використання компресора, що призводить до зростання енерговитрат на виробництво кінцевого продукту. В даний час водень стискається переважно за допомогою поршневих компресорів, що мають низьку ефективність. Наприклад, адіабатний ККД компресора для водневої заправної станції продуктивністю 1000 кг/сут становить 56% і ККД мотора 92%. В результаті майже 11,3% енергії водню на заправці витрачається на його компресію.

Одним з нових напрямків у розвитку енергоакумулюючих технологій є переобладнання шахти в гідроакумулюючу електростанцію. У своїй роботі електростанції такого типу використовують комплекс генераторів і насосів або оборотні гідроелектроагрегати. Вони можуть працювати як в якості генераторів, так і в якості насосів. Вночі воду перекачують в резервуар, що знаходиться відносно високо. Вранці і ввечері, під час пікового споживання енергії така електростанція скидає отриману воду з верхнього резервуара в нижній, генеруючи енергію. Прикладом використання такої технології є шахта Проспер-Ханіель (Північний Рейн-Вестфалія, Німеччина)<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup>Див.: <https://habr.com/ru/articles/402579/>.

В Україні існує великий потенціал в цьому напрямі. Як було показано, за останні чотири-п'ять років перед війною відбулося вибухове зростання встановлених і підключених генеруючих потужностей на основі ВДЕ. Проте однією з великих проблем залишилося питання щодо акумулювання надлишків енергії, яка виробляється в години полупіку (особливо влітку) або мінімуму електричних навантажень. Використання традиційних регуляторів і маневрених потужностей у вигляді Дніпровського каскаду гідроелектростанцій і Дністровської гідроакumuлюючої електростанції в найближчому майбутньому може не покрити всі потреби електроенергетики. Тому пропонується використання різних акумулюючих і регулюючих систем на основі різних технологій. Найбільш перспективною з яких виглядає технологія на основі водневих систем і гідролізу води. Їх застосування не тільки екологічно безпечно, але і в перспективі надасть можливість для істотного зниження тарифів на електроенергію.

#### 8.4 Досвід використання систем регулювання генерації електроенергії в Україні і світі

Термін «duck curve» з'явився у 2012 році в сонячній Каліфорнії. За його допомогою диспетчери місцевого системного оператора CAISO влучно описали форму графіка, що має видати традиційна керована генерація для покриття різниці між споживанням в енергосистемі та виробництвом некерованої генерації з відновлюваних джерел енергії (див. рис. 8.9).

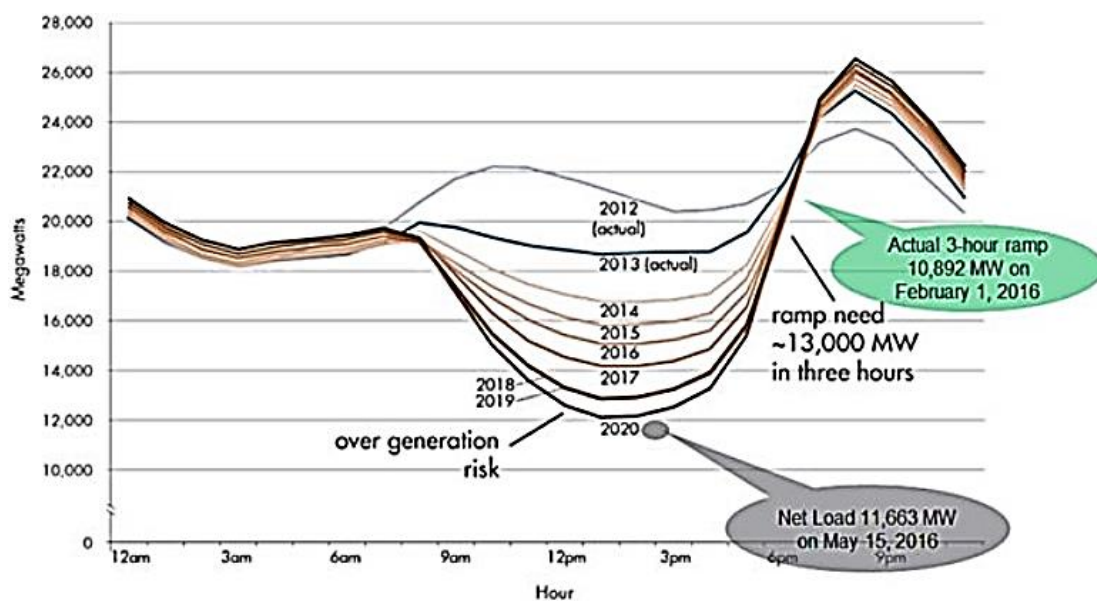


Рисунок 8.9 – Форма графіка керованої генерації електроенергії  
(Джерело: [16])

Вивчаючи існуючу проблему, О. Карпенко (керівник групи адміністрування комерційного обліку НЕК «Укренерго») описує приклад Каліфорнії, що свого часу теж стикнулась з бумом будівництва сонячних електростанцій (СЕС) [16]. Американські вчені заздалегідь прорахували, що за таких темпів росту генерації з ВДЕ у 2020 році для балансування енергосистеми буде необхідно мати керовану (маневрову) генерацію, що зможе видати 13 ГВт потужності менш ніж за три години. Оскільки до них не прислухалися, закінчилось це прогнозовано – для балансування енергосистеми вже з 2014 року CAISO почав застосовувати "curtailment" – обмеження надвиробництва СЕС, яке з кожним роком зростає (див. рис. 8.10). Найбільше вони застосовуються у найважчі для енергосистеми дні – в міжсезоння, коли споживання падає, а сонце піднімається вже високо і в повну силу світить на поля СЕС.

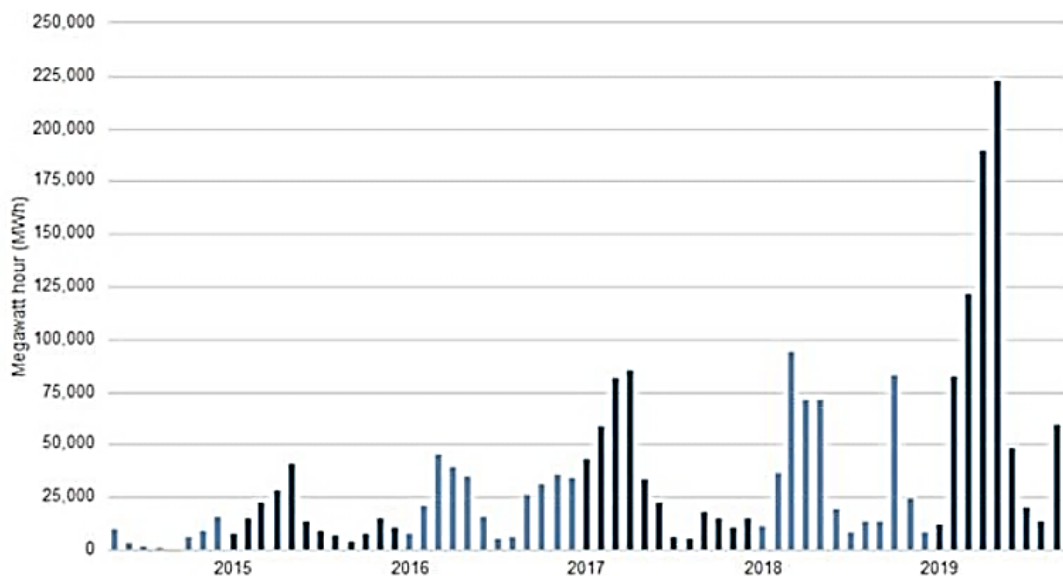


Рисунок 8.10 – Тенденції обмеження надвиробництва електроенергії СЕС – Каліфорнія, США (Джерело: [16])

Про швидке і неминуче настання цього ефекту в нашій енергосистемі українські електроенергетики прогнозували ще років п'ять тому. Спеціалісти зазначали, що, замість надмірного стимулювання розвитку одного виду генерації, треба виконувати вимоги Національного плану дій з ВДЕ 2020, тобто розвивати ВЕС і СЕС збалансовано з побудовою маневрових ГАЕС. Але сценарій почав відбуватися подібно, як і в Каліфорнії – СЕС поки будуються без врахування проблем можливого надвиробництва. Коли бум будівництва ВЕС і СЕС за наявності найвищого в світі «зеленого тарифу» досяг загрозливого темпу, вже європейські експерти та донори почали рекомендувати переходити на більш збалансовані стимули – «зелені аукціони». Розуміючи, що гроші на виплати «зелених тарифів» не беруться з повітря, історія може закінчитися іспанським варіантом ретроспективного обмеження тарифів.

Як було показано вище, вітрові та сонячні електростанції характеризуються нестабільністю поточної потужності. Впродовж доби можливі часті зміни величини генерованої активної потужності в значному діапазоні, що може позначитись на роботі інших електростанцій енергосистеми та споживачів. Для того, щоб завчасно реагувати на ці зміни, електроенергетична система повинна розвиватись з урахуванням зростання частки відновлюваних джерел енергії в енергобалансі країни. Тому інтегрування значної потужності вітрових та сонячних електростанцій до складу електроенергетичної системи потребує урахування впливу нестабільного характеру генерації на збалансованість роботи електроенергетичної системи.

В роботах фахівців з електроенергетики, зокрема О. О. Кармазіна [17], встановлено, що інтеграція ВЕС та СЕС на рівні до 10% від загального споживання електричної енергії в ОЕС України не веде до зростання варіативності чистого навантаження (частини навантаження, що покривається традиційними електростанціями). Значення стандартного відхилення та максимальної позитивної 1-годинної зміни чистого навантаження становлять 0,023 та 0,037 в.од./год. відповідно. При подальшому збільшенні частки ВЕС та СЕС зміни потужності цього типу електростанцій переважають над змінами навантаження споживачів.

Існуюча на початок 2019 року структура генеруючих джерел дозволяє інтегрувати ВЕС та СЕС сумарно до 4 ГВт без погіршення показників балансової надійності об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України. При цьому подальше нарощування потужності вітрових та сонячних електростанцій потребує зміни структури генеруючих джерел, або обмеження потужності базових електростанцій, ВЕС та СЕС.

На рис. 8.11 наведено приклад однієї доби восени 2020 року: червона крива – споживання в Україні, блакитна – графік роботи традиційної генерації, різницю між цими кривими виробила генерація з ВДЕ. Того дня, для того, щоб збалансувати енергосистему, диспетчери пішли на безпрецедентний крок – запустили вдень ГАЕС на закачку. Ситуація повторилась через тиждень.

За інформацією НКРЕКП блакитна крива у 2020 році посунулася в денні години ще нижче. Крім того, українська енергосистема має особливість: у паводок ГЕС працюють на повну і майже не можуть маневрувати. За такого режиму і високої бази АЕС, в енергобалансі не залишається достатньої кількості маневрової генерації, що може забезпечити необхідні резерви та ефективно закрити різке вечірнє зростання споживання.

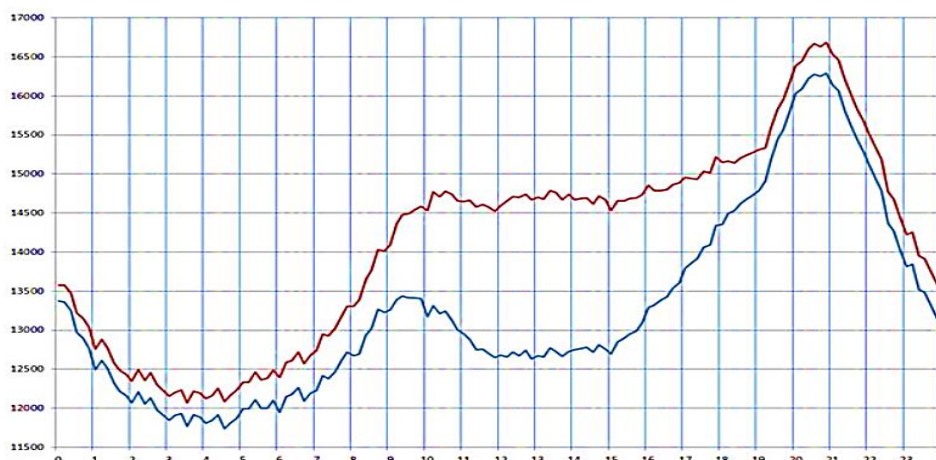


Рисунок 8.11 – Добовий графік роботи ЕЕС України  
(Джерело: [18])

Як інший приклад можна навести ситуацію, що сталася 5 листопада 2019 року. Тоді НЕК «Укренерго» вперше вимушено обмежила вироблення «зеленої» генерації в складі Ботієвської, Приморської-1 і Орловської ВЕС<sup>8</sup>. Як уточнив глава НЕК «Укренерго» (на той час) Всеволод Ковальчук, через зниження споживання електроенергії, викликаного теплим листопадом, диспетчери оператора енергосистеми України вводили обмеження для трьох ВЕС з 3:44 до 4:00 і з 5:25 до 6:00 ранку вівторка, 5 листопада. Перший раз сумарна величина обмеження склала 300 МВт, а в другій - вже 395 МВт [18]. При цьому були відключені в резерв (або перенесений запуск на денний час) сім енергоблоків на ТЕС. Також диспетчерам довелося розвантажити більш ніж на 500 МВт щодо комерційного графіка ТЕЦ і ТЕС, які залишалися в роботі. Обмеження цих ВЕС було вимушеним кроком, усі пропозиції учасників балансууючого ринку були вичерпані, а різниця між торговим і фізичним графіками генерації становила близько 1620 МВт.

Очікувалося, що у період до 2035 року для рівнів інтеграції ВДЕ 25% від загального споживання електроенергії в ОЕС України буде спостерігатися дефіцит високоманеврових потужностей. Дана потреба може бути вирішена за рахунок будівництва систем акумулювання електричної енергії або глибокої реконструкції існуючих енергоблоків ТЕС.

<sup>8</sup>Ред. Вказані об'єкти належать Групі ДТЕК – сьогодні вони залишилися на окупованій території і доля їх невідома. У травні 2023 року ДТЕК запустив першу чергу Тилігульської ВЕС у Миколаївській області потужністю 114 МВт, що після закінчення стане найбільшою вітровою електростанцією в Україні та Східній Європі – потужністю 500 МВт. У листопаді 2023 році на Кліматичній конференції COP28 ДТЕК підписав меморандум з виробником вітрових турбін Vestas, який надасть допомогу у завершенні будівництва цієї ВЕС (див.: <https://dtek.com/en/media-center/news/dtek-and-vestas-ready-to-implement-ukraines-largest-private-investment-project-in-the-energy-sector-since-gaining-independen/>).



## **8.5 Об'єднана енергетична система України. Режими роботи і графіки навантажень**

Об'єднана енергетична система України (далі – ОЕС) – це сукупність атомних, теплових, гідравлічних і гідроакумуючих електростанцій, теплоелектроцентралі, а також електростанції з відновлювальних джерел енергії (вітряні, сонячні та інші), магістральні електричні мережі Укренерго та розподільчі електромережі (обленерго), які об'єднані спільним режимом виробництва, передачі та розподілу електричної та теплової енергії<sup>9</sup>.

Режим роботи ОЕС визначається виходячи з балансу виробництва та споживання потужності, ремонтів електромереж та генеруючого обладнання, а також можливості ліквідації аварійних ситуацій у разі відключення генеруючого обладнання на електростанціях та магістральних ліній електропередачі. Для запобігання порушенням режиму роботи ОЕС України або її окремих частин внаслідок певних факторів компанія Укренерго вживає необхідні заходи для обмеження споживання електричної енергії та потужності, а також застосовує спеціальні графіки і протиаварійні системи зниження електроспоживання.

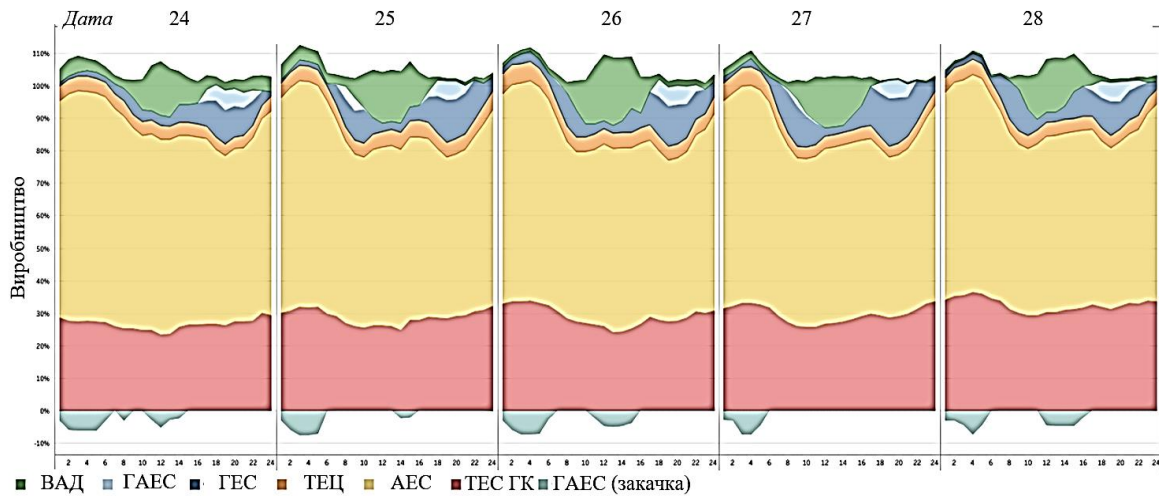
Енергосистема України відрізняється надлишковою встановленою потужністю – загальна потужність всіх підключених до ОЕС електростанцій становить приблизно 50 ГВт (за винятком тих, які працюють в ізолюваних мережах). Таким чином, Україна є однією з небагатьох європейських країн, яка володіє значним резервом електрогенеруючих потужностей. Звідси виникають два пов'язаних між собою питання: як цей «надлишок» електроенергії використовувати і, головне, як вирішити проблеми нерівномірності графіка навантаження енергосистеми, зокрема, що пов'язані з «провалом» споживання електроенергії у нічний час.

За даними Міненерго України [2], нічний надлишок потужностей в Україні становить понад 1100 МВт і має тенденцію до зростання. А в зв'язку з вибуховим впровадженням систем генерації з ВДЕ в денний час також з'явився надлишок генеруючих потужностей (див. рис. 8.12) [9].

Одним з напрямів використання надлишкових потужностей і згладжування добового графіка споживання енергії є використання роботи енергоємних промислових підприємств і акумулювання надлишкової енергії в нічний час. Для цього застосовують гідроакумуючі станції та вироблення теплової енергії з подальшим її використанням в денний час. Однак, обидва зазначених види акумулювання характеризуються великими тепловими та гідравлічними втратами, що досягають 35% і більше. Тому, необхідні пошуки нових нетрадиційних методів вирішення проблеми вирівнювання пікових і напівпікових навантажень.

---

<sup>9</sup>Див.: Сайт Оператору ринку – <https://www.oree.com.ua/index.php/vocabulary>.



**Рисунок 8.12** – Частка виробництва (по видам генерації) від обсягу споживання за 24-27 жовтня 2021 року

Безсумнівно, що найбільш ефективний державний підхід, при якому проблема покриття нерівномірності графіків електричного навантаження може бути вирішена наступним чином:

- створенням оптимальної структури генеруючих потужностей енергосистеми;
- використанням перетоків з сусідніми енергосистемами
- залученням споживачів до вирівнювання графіка навантаження енергосистеми за рахунок адміністративних (обмежують) і економічних (стимулюючих) заходів.

Географічне розташування та наявність потужних міждержавних ліній електропередачі ОЕС України дозволяє забезпечувати значний обмін електроенергією з енергетичними системами країн Європейського Союзу (зокрема Угорщини, Словаччини, Польщі та Румунії). Зв'язок з енергосистемами інших країн здійснюється через міждержавні лінії електропередачі Укренерго. Це забезпечує взаємовигідний обмін електроенергією, дозволяє підвищити надійність енергопостачання споживачів та інтеграцію ринків електроенергії різних країн.

ОЕС України розділяється на дві частини. Основна частина ОЕС України працює паралельно з енергооб'єднанням деяких країн СНД та Балтії, а інша – «Острів Бурштинська ТЕС» – у складі об'єднання електроенергетичних систем континентальної Європи ENTSO-E. Паралельна робота ОЕС України в складі потужних енергооб'єднань дозволяє підвищити надійність її роботи, знизити потужність сумарної величини аварійного резерву, який необхідний для її роботи.

Зокрема, перед війною Укренерго здійснювала експорт електроенергії міждержавними ЛЕП у наступних напрямках: з «Острова Бурштинської ТЕС» до Угорщини, Словаччини, Румунії – з максимальною потужністю до 650 МВт. За «Направлена передача» по ЛЕП 220кВ Добровірівська ТЕС – Замость (Польща) – величина потужності максимального допустимого експорту складала до 235 МВт; Молдавська енергосистема – максимальна величина перетоку між ОЕС України та ЕС Молдови складала до 700 МВт, але могла обмежуватися до нуля<sup>10</sup>.

Для аналізу графіків електричних навантажень об'єднаної енергосистеми України скористаємося даними офіційного сайту Національної енергетичної компанії «Укренерго», яка надає у вільному доступі добові графіки генерації і споживання електроенергії України [19]. При цьому, у зв'язку з великим обсягом інформації, розглядати будемо найбільш характерні добові графіки в зимовий, весняний, літній та осінній періоди (див. рис. 8.13–8.16).

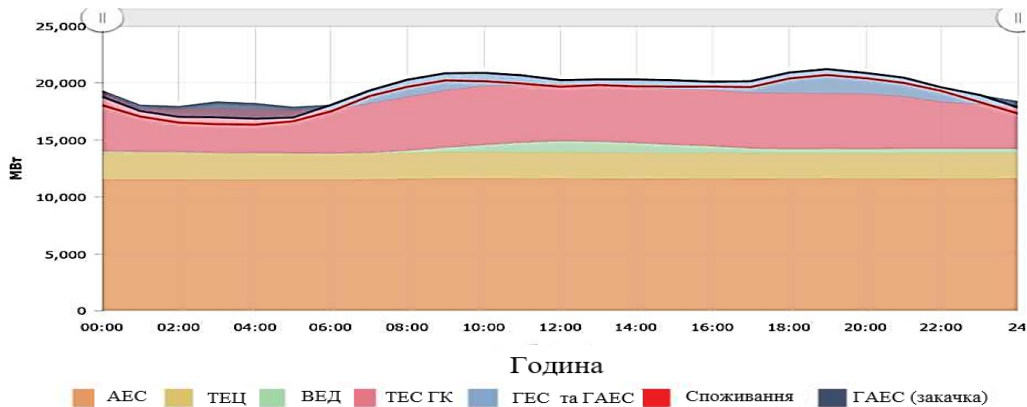


Рисунок 8.13 – Добовий графік ОЕС України за 28.02.2019 р.

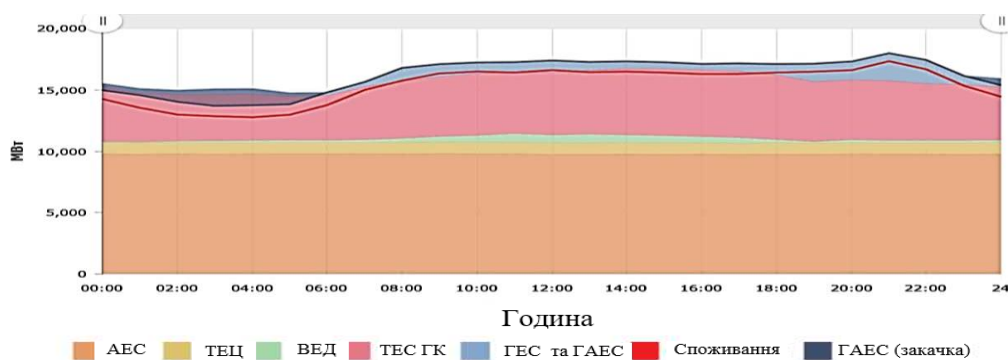


Рисунок 8.14 – Добовий графік ОЕС України за 07.05.2019 р.

<sup>10</sup>Ред. Під час війни експорт з України не здійснюється. З 1 грудня технічна можливість імпорту електроенергії з Європи до України та Молдови складає 1700 МВт. Станом на 26 грудня 2023 року імпорт електроенергії відбувається впродовж всієї доби зі Словаччини, Польщі, Румунії та Молдови: загальний обсяг 19 619 МВт·год, з максимальною потужністю в окремі години до 1 190 МВт (див.: Укренерго – <https://t.me/s/Ukrenergo?before=2548>).

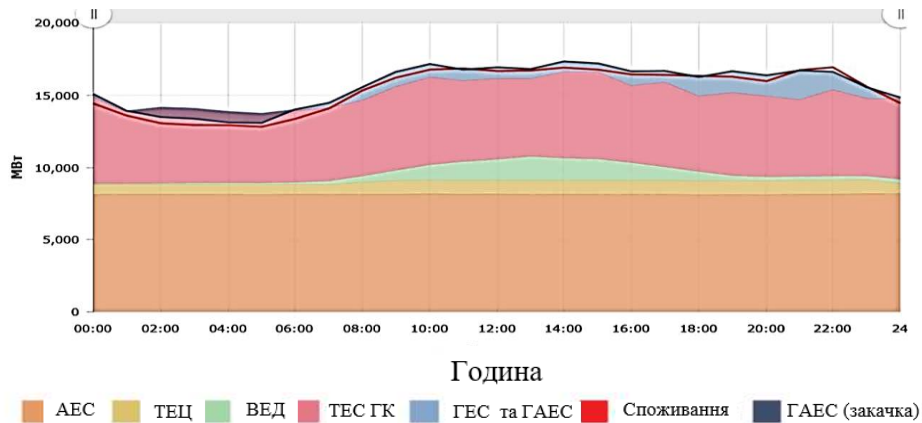


Рисунок 8.15 – Добовий графік ОЕС України за 31.07.2019 р.

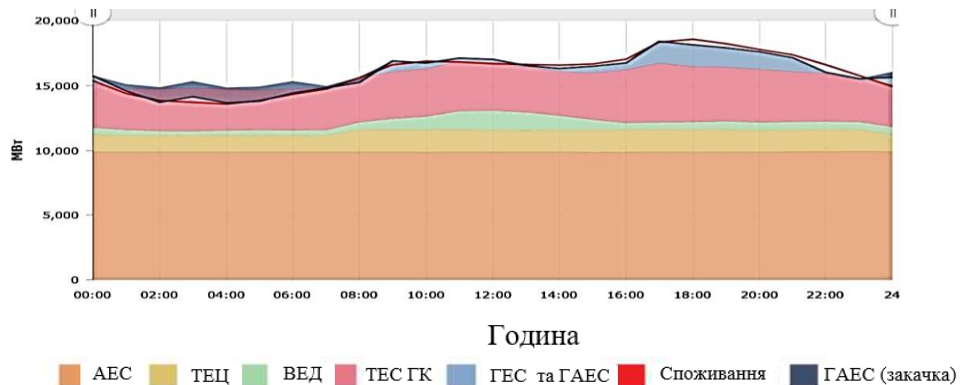


Рисунок 8.16 – Добовий графік ОЕС України за 09.11.2019 р.

Як видно з графіків, рівень генерації від атомних електростанцій і ТЕЦ є постійним і протягом доби практично незмінним. Генерація від ТЕС є також досить постійною величиною, хоча ці потужності і беруть участь в регулюванні енергосистеми. Основними маневровими потужностями в Україні є ГЕС і ГАЕС. Саме їх генеруючі потужності дозволяють «погасити» піки електричних навантажень в ранкові та вечірні години. При цьому генерація з відновлюваних джерел енергії відбувається, в основному, в денний час.

Причому пік цієї генерації не збігається за часом з ранковим і вечірнім максимумом навантажень. Це призводить до надлишку генеруючих потужностей в денний час (див. рис. 8.13–8.14) і, як наслідок, до подорожчання процесу генерації електроенергії. До того ж недолік вільних регулюючих потужностей в вечірній час призводить до нестачі генеруючої електроенергії, що наочно видно на рис. 8.15 і 8.16. З ростом частки СЕС в загальному обсязі генерації ОЕС України всі перераховані проблеми будуть тільки збільшуватися. Якщо своєчасно не вжити заходів і не впровадити системи акумулювання електроенергії, що дозволяють запасати її у денний час і віддавати в мережу в години ранкового і вечірнього максимумів навантажень.

Далі в роботі будуть розглянуті можливі варіанти впровадження необхідних акумулюючих потужностей і проаналізовано необхідна їх кількість з урахуванням перспективи розвитку СЕС до 2035 року.

### **8.6 Визначення необхідної потужності системи регуляторів з урахуванням довгострокової перспективи до 2035 року**

Електричне навантаження окремих споживачів, отже, і сумарне їх навантаження, що визначає режим роботи електростанцій в енергосистемі, безперервно змінюється. Прийнято відображати цей факт графіком навантаження або діаграмою зміни потужності (струму) електроустановки в часі.

Як правило, графіки відображають зміну навантаження за певний період часу. За цією ознакою їх поділяють на добові (24 год), сезонні та річні.

За місцем вивчення або елемента енергосистеми, до якого вони належать, графіки можна розділити на наступні групи:

- графіки навантаження споживачів, які визначаються на шинах підстанцій;
- мережеві графіки навантаження – на шинах районних і вузлових підстанцій;
- графіки навантаження електростанцій;
- графіки навантаження енергосистеми, що характеризують результуюче навантаження енергосистеми.

Графіки навантаження використовують для аналізу роботи електроустановок, для проектування системи електропостачання, для складання прогнозів електроспоживання, планування ремонтів обладнання, а також в процесі експлуатації для ведення нормального режиму роботи.

Для більш детального аналізу зробимо розрахунок основних показників добових графіків навантаження ОЕС України, раніше наведених на рис. 8.13 – 8.16.

Кількість годин роботи з максимальним навантаженням в зимовий час становить:

$$T_{MP}^{ЗИМ} = \frac{t \cdot \sum P_i^{ЗИМ}}{P_{max}^{ЗИМ}} = \frac{1,0 \cdot 455,1}{20,7} = 21,9 \text{ год}, \quad (8.1)$$

де:  $t$  – інтервал часу між показаннями лічильника (1,0 год);

$P_i^{ЗИМ}$  – потужність за  $i$ -тий проміжок часу;

$P_{max}^{ЗИМ}$  – максимальна потужність за весь період.

Далі знайдемо коефіцієнт заповнення графіка:

$$K_{ЗГР}^{ЗИМ} = \frac{\sum P_i^{ЗИМ} \cdot t}{T_{см} \cdot P_{max}^{ЗИМ}} = \frac{1,0 \cdot 455,1}{24 \cdot 20,7} = 0,9, \quad (8.2)$$

де:  $T_{см}$  – тривалість періоду вимірів (24 години).

Середнє навантаження визначають за формулою:

$$P_{cp}^{ЗИМ} = \frac{\sum P_i^{ЗИМ} \cdot t}{T_{см}} = P_{max}^{ЗИМ} \cdot K_{ЗГР}^{ЗИМ} = 20,7 \cdot 0,9 = 18,6 \text{ тис. МВт.} \quad (8.3)$$

Коефіцієнт максимуму:

$$K_M^{ЗИМ} = \frac{P_{max}^{ЗИМ}}{P_{cp}^{ЗИМ}} = \frac{20,7}{18,6} = 1,1. \quad (8.4)$$

Визначимо можливу глибину регулювання для ТЕС:

$$A_{ТЕС}^{ЗИМ} = P_{maxТЕС}^{ЗИМ} - P_{minТЕС}^{ЗИМ} = 5,2 - 3,8 = 1,4 \text{ тис. МВт,} \quad (8.5)$$

де:  $P_{maxТЕС}^{ЗИМ}$  – максимальна потужність ТЕС, тис. МВт;

$P_{minТЕС}^{ЗИМ}$  – мінімальна потужність ТЕС, тис. МВт.

Визначимо можливу глибину регулювання для ГЕС:

$$A_{ГЕС}^{ЗИМ} = P_{maxГЕС}^{ЗИМ} - P_{minГЕС}^{ЗИМ} = 2,1 - 0,1 = 2,0 \text{ тис. МВт,} \quad (8.6)$$

де:  $P_{maxГЕС}^{ЗИМ}$  – максимальна потужність ГЕС, МВт;

$P_{minГЕС}^{ЗИМ}$  – мінімальна потужність ГЕС, МВт.

Визначимо необхідну глибину регулювання для споживачів ОЕС України:

$$A_{НАВ}^{ЗИМ} = P_{maxНАВ}^{ЗИМ} - P_{minНАВ}^{ЗИМ} = 20,7 - 16,4 = 4,3 \text{ тис. МВт,} \quad (8.7)$$

де:  $P_{maxНАВ}^{ЗИМ}$  – максимальна потужність, яка споживається з ОЕС України, МВт;

$P_{minНАВ}^{ЗИМ}$  – мінімальна потужність, яка споживається з ОЕС України, МВт.

Дефіцит регулюючих потужностей становить:



$$\Delta_A^{ЗИМ} = A_{ГЕС}^{ЗИМ} + A_{ГЕС}^{ЗИМ} - A_{НАВ}^{ЗИМ} = 1,4 + 2,0 - 4,3 = -0,9 \text{ тис. МВт.} \quad (8.8)$$

Для інших добових графіків розрахунок проводиться аналогічно. З метою скорочення часу всі наступні розрахунки були виконані з використанням програмного продукту Microsoft Excel. Результати виконаних розрахунків зведені в табл. 8.3.

**Таблиця 8.3** – Розрахунок основних показників добових графіків навантаження ОЕС України.

Період	Т <sub>МР</sub> , год	К <sub>згр</sub>	Р <sub>ср</sub> , тис. МВт	К <sub>М</sub>	А <sub>ГЕС</sub> , тис. МВт	А <sub>ГЕС</sub> , тис. МВт	А <sub>НАВ</sub> , тис. МВт	Δ <sub>А</sub> , тис. МВт
Зима	21,9	0,9	18,6	1,1	1,4	2,0	4,3	-0,9
Весна	22,2	0,91	15,6	1,1	1,8	1,9	4,5	-0,8
Літо	22,7	0,94	15,9	1,06	1,4	1,9	4,1	-0,8
Осінь	21,5	0,89	16,6	1,12	1,6	1,6	5,0	-1,8

Графіки навантажень тоді приймуть вид, наведений на рис. 8.17 – 8.20. Як видно з проведених розрахунків в Україні вже бракує регулювальних генеруючих потужностей. Поки вони компенсувалися за рахунок закачування води для ГЕС в нічні часи. Але ці резерви практично вичерпані. У разі збільшення частки ВДЕ в загальній системі генерації ОЕС України може розбалансуватися. Проведемо аналіз виду графіків навантаження у випадку збільшення частки ВДЕ до 25%, як це передбачає план розвитку до 2035 року.

Як видно з графіків навантаження, особливо в літній та осінній періоди, при збільшенні частки генерації від ВДЕ до 25% енергосистема країни може виявитися практично не керованою. Існуючих акумулюючих потужностей не вистачить щоб погасити сплеск генерації в денний час і компенсувати зростаюче споживання в години ранкового і вечірнього максимумів. У такій ситуації регулятор буде змушений відключати СЕС від електромережі, оскільки генеруюча ними енергія буде просто не потрібна.

У той же час, відповідно до Закону про «зелену» електроенергію, генеруючи СЕС все одно будуть отримувати гроші за електроенергію. Що призведе до її подорожчання для підприємств і населення. В цих умовах єдиним виходом є впровадження систем акумулювання електроенергії, виробленої СЕС в денний час, бажано на основі водневих накопичувачів.

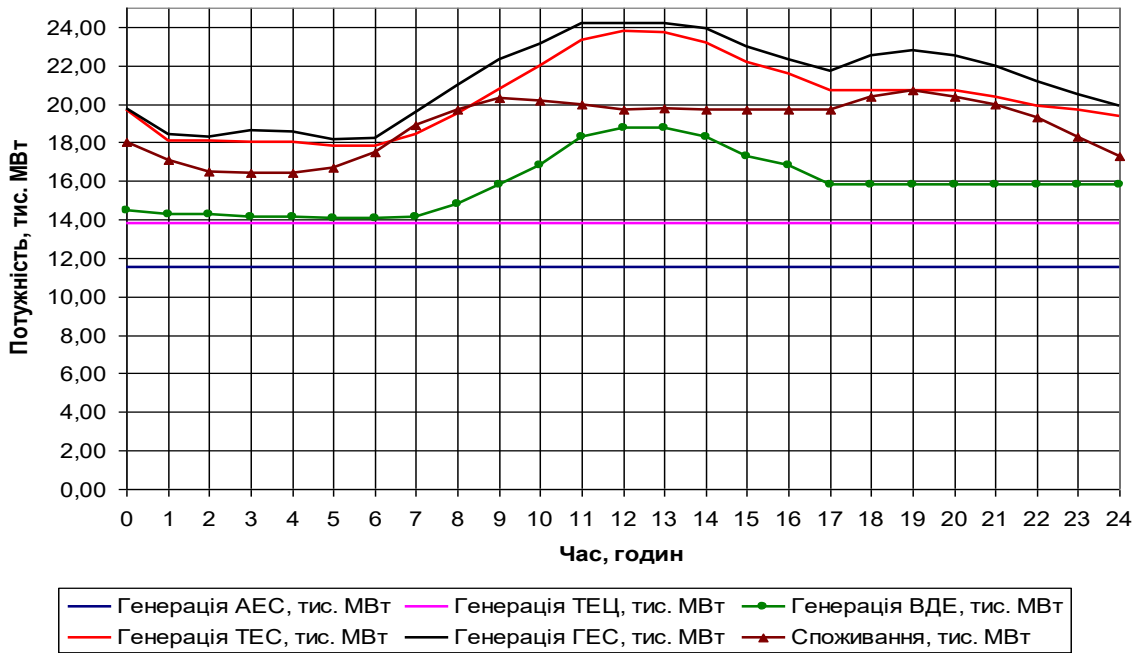


Рисунок 8.17 – Добовий графік ОЕС України за 28.02.2019 р. в разі збільшення частки ВДЕ до 25%

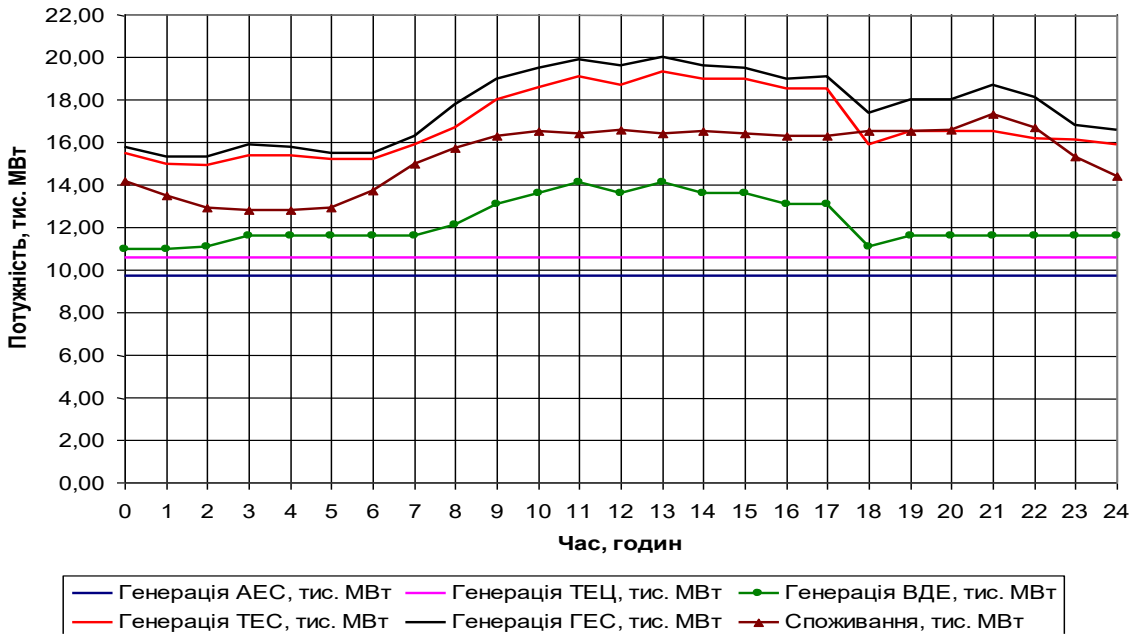


Рисунок 8.18 – Добовий графік ОЕС України за 07.05.2019 р. в разі збільшення частки ВДЕ до 25%

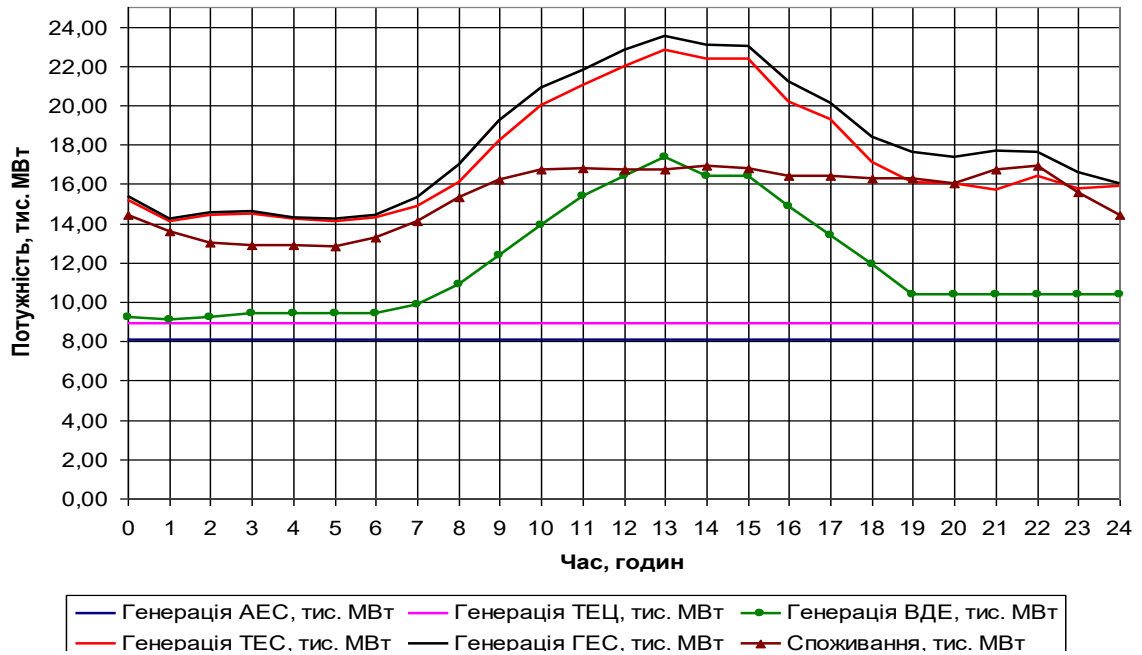


Рисунок 8.19 – Добовий графік ОЕС України за 31.07.2019 р. в разі збільшення частки ВДЕ до 25%

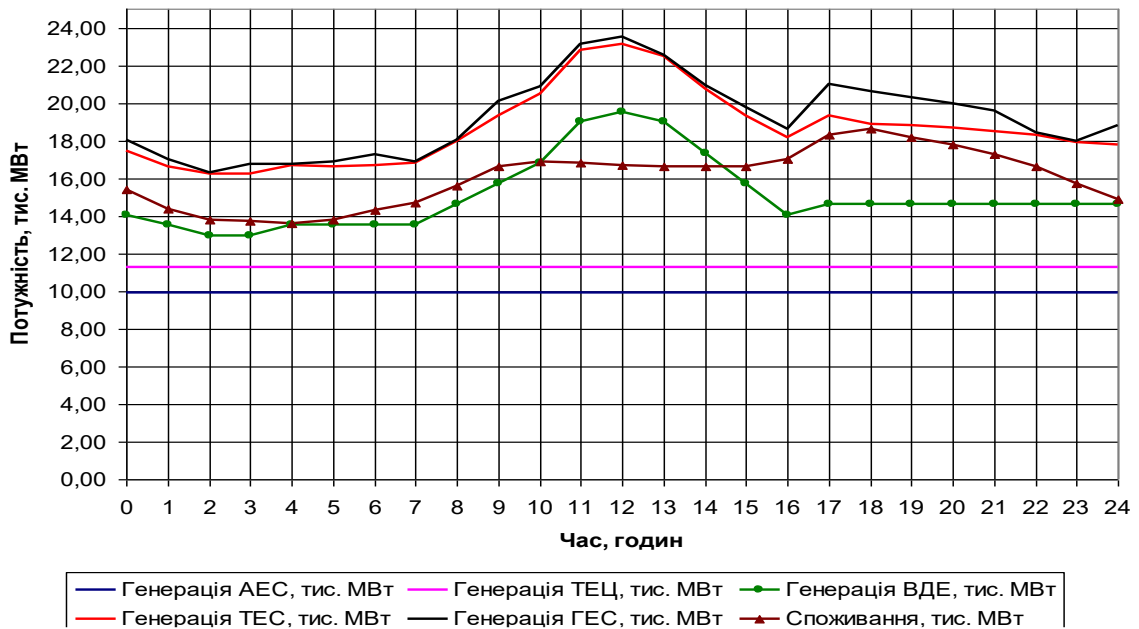


Рисунок 8.20 – Добовий графік ОЕС України за 09.11.2019 р. в разі збільшення частки ВДЕ до 25%

Зберігання енергії можливо з використанням різних фізичних принципів перетворення електричної енергії для її акумулювання, які були розглянуті нами раніше. Найбільш перспективним представляється використання водневої енергетики. Воднева енергетика включає сукупність технологій виробництва, транспортування, акумулювання і використання універсального вторинного енергоносія – водню. У концепції водневої енергетики водень доповнює собою найважливіший вторинний енергоносіє – електроенергію, енергетичне використання водню визначається можливістю екологічно чистого отримання електроенергії і тривалого зберігання без втрат, в тому числі великомасштабного.

Проблема використання водню як перспективного екологічно чистого та універсального енергоносія і акумулятора енергії в різних галузях народного господарства була сформульована на початку 70-х років минулого століття після першої паливної кризи. Стало ясно, що необхідна розробка нових екологічно безпечних енергетичних технологій, заснованих на використанні поновлюваних енергоджерел, атомної енергії та універсальних екологічно чистих енергоносієв, здатних замінити невідновлювані енергоресурси в міру їх виснаження і подорожчання.

Водень як вторинний енергоносіє відмічений у Порядку денного на XXI століття. У документі йдеться про те, що водень буде грати ключову роль у досягненні доступної, чистої та процвітаючої економіки, оскільки протистоїть викликам зміни клімату, нестійкого виробництва нафти і забруднення навколишнього середовища. Водень може грати ключову роль в середньодалеких і магістральних перевезеннях автомобільним і залізничним транспортом, в прибережному і міжнародному судноплавстві, в авіаційних перевезеннях, а також в довгостроковому і сезонному зберіганні електроенергії в мережах<sup>11</sup>.

Щодо використання водню у ВДЕ, як вже описувалося раніше, процес зводиться до отримання водню шляхом електролізу, зберігання водню в стислому або твердофазному пов'язаному вигляді і отримання електричної енергії з використанням електрохімічних генераторів (паливних елементів) або спалюючих установок. Для виробництва енергії в сучасній розподіленій системі енергетики і системах акумулювання пропонується використовувати водневі паливні елементи – хімічні джерела струму (ХДС), що здатні перетворювати хімічну енергію в електричну енергію при електрохімічних процесах з постійним надходженням активних речовин: водню і окислювача. На відміну від гальванічних елементів ТЕ можуть продовжувати працювати, поки здійснюється підведення реагентів (палива і окислювача) і відведення продуктів реакції.

---

<sup>11</sup> Ред. Наприкінці травня 2020 року в Брюсселі, віце-президент єврокомісії Франс Тіммерманс презентував план розвитку водневої галузі до 2030 року під назвою – Green Hydrogen Investment and Support Report.

Зростання інтересу до водневих енергетичних технологій останнього часу більшою мірою пов'язано з успіхами в розробці і створенні електрохімічних генераторів (паливних елементів), що перетворюють водень і кисень повітря в електричну енергію з високим ККД. З усіх типів паливних елементів найбільш перспективними бачимо системи на основі полімерелектролітних осередків (твердополімерні паливні елементи, ТППЕ), що характеризуються низькими робочими температурами, високою щільністю потоку енергії в одиночній комірці і великим терміном служби при правильній експлуатації.

До теперішнього часу в світі створено велику кількість успішних демонстраційних і промислових систем на основі ТППЕ, в тому числі транспортних, однак подальший розвиток технології стримується низкою технічних проблем, де ключовою є проблема зберігання водню, як на борту транспортного засобу, так і в стаціонарних енергетичних установках. Серед розроблюваних нових технологій і пристроїв зберігання водню найбільш економічно прийнятними і безпечними можуть стати пристрої та системи, засновані на використанні оборотних металогідридів – інтерметалічних сполук (ІМС), здатних вибірково і оборотно поглинати водень. При цьому основна маса водню в системі знаходиться в зв'язаному твердофазному стані, що забезпечує підвищену безпеку при експлуатації.

На підставі вивчених особливостей технологій металогідридного зберігання і очищення водню можна виділити наступні перспективні сфери їх застосування:

- в якості систем зберігання водню для енергоустановок резервного живлення різних об'єктів в поєднанні з ТЕ або ДВС;
- в якості систем акумулювання енергії для стаціонарних та автономних енергоустановок на основі сонячної і вітрової енергії;
- в якості систем очищення водню різного походження, наприклад біоводню, в автономних системах енергозабезпечення або когенераційних (виробництво електроенергії, тепла і водню);
- як джерело водню для аналітичних систем, що вимагають дотримання умов безпеки зберігання водню в приміщенні, наприклад в хроматографії;
- в якості портативних джерел живлення для військових застосувань.

Сонячно-водневі енергетичні системи по іншому ще називаються перезаряджаємими водневими елементами [20]. Вони складаються з сонячних панелей, які б виробляли електрику, ємності з водою і мембрани, що розділяє водень і кисень. У денний час сонячні панелі виробляють електрику, за допомогою якої проводиться електроліз води. Утворений в результаті водень накопичується у спеціальних ємностях і може бути використаний для вироблення електрики в паливних елементах вночі. Розробники створили систему поділу з двох нікелевих електродів, між якими розмістили полімерну мембрану Nafion компанії Dupont.

Така мембрана забезпечує високу іонну провідність, але не дає молекулярному водневі або кисню проникати в її катодні і анодні області.

Визначимо необхідну потужність подібної системи як середнє значення можливої глибини регулювання СЕС в різні пори року.

$$A_{CEC} = \frac{(P_{\max CEC}^{ЗИМ} - P_{\min CEC}^{ЗИМ}) + (P_{\max CEC}^{BEC} - P_{\min CEC}^{CEC}) + (P_{\max CEC}^{ЛІТ} - P_{\min CEC}^{ЛІТ}) + (P_{\max CEC}^{ОСН} - P_{\min CEC}^{ОСН})}{4} =$$

$$= \frac{(5 - 0,25) + (3,5 - 0,4) + (8,5 - 0,2) + (8,25 - 1,65)}{4} = 5,6 \text{ тис. МВт.} \quad (8.9)$$

В сучасній літературі [20-21] відмічається, що промислові водневі системи акумулювання ще дуже слабо представлені на ринку.

Основними особливостями зразків, що пропонуються, є:

- висока питома потужність, що досягає 100 МВт;
- низький вміст недогорілих компонентів водню і кисню на виході (менше 2% (об.);
- широкий діапазон потужності створених експериментальних моделей (від 20 кВт до 50 МВт);
- мінімальний час запуску і виходу на робочий режим (менше 10 секунд);
- використання в якості охолоджувача та балластіровочного компонента – води;
- можливість роботи як на газоподібних, так і на рідких компонентах окислювача.

Приймаючи одиночну потужність акумулюючої водневої установки 50 МВт, загальна кількість установок складе:

$$N_{ABY} = \frac{A_{CEC}}{P_{ABY}} = \frac{5600}{50} = 112 \text{ шт.} \quad (8.10)$$

Отже, можна зробити висновок, що для перетворення електричної енергії для її акумулювання найбільш перспективним представляється використання водневої енергетики. З урахуванням збільшенні частки генерації від ВДЕ до 25%, як це передбачає план розвитку до 2035 року, системи акумулювання електроенергії на основі водневих накопичувачів загальною потужністю близько 5,6 ГВт є дуже перспективними для енергосистеми України.



## **8.7 Висновки**

1 Підсумовуючи і аналізуючи інформацію з офіційних джерел можна зробити висновок, що при збереженні темпів введення в експлуатацію генеруючих потужностей з ВДЕ, відновлювальна енергетика протягом найближчих 10 років може отримати до 30% ринку виробленої електричної енергії країни. Однак у зв'язку з фізичною природою процесів вироблення електричної енергії системами з ВДЕ, яка є періодичною, необхідно передбачити установку і підключення до енергосистеми України регуляторів електричної потужності. Існуюча структура генеруючих джерел дозволяє інтегрувати ВЕС та СЕС сумарно до 4 ГВт без погіршення показників балансової надійності ОЕС України.

2 Значна добова і тижнева нерівномірність електроспоживання чинить негативний вплив на показники роботи ЕЕС: зниження числа годин використання встановленої потужності, що негативно позначається на кінцевих результатах діяльності; збільшення питомих витрат палива за рахунок нерівномірного режиму роботи обладнання; прискорення зносу обладнання; зниження ефективності теплофікації за рахунок прямого редукування гострого пара; погіршення якості електричної і теплової енергії, що відпускається споживачам і т. п. Для підвищення економічної ефективності енергетичного господарства здійснюють навмисну зміну конфігурації графіків електричних навантажень ЕЕС. При цьому використання акумулюючих потужностей можуть позитивно позначатися на вартості електроенергії для кінцевих споживачів.

3 Аналіз добових графіків електричних навантажень ОЕС України і проведені розрахунки показали, що вже сьогодні в країні формується дефіцит акумулюючих потужностей в межах 1 ГВт. Українська енергосистема має особливість: у паводок ГЕС працюють на повну. За такого режиму і високої бази АЕС, в енергобалансі не залишається достатньої кількості маневрової генерації, що може забезпечити необхідні резерви та ефективно закрити різке вечірнє зростання споживання.

4 Для того, щоб завчасно реагувати на можливі часті зміни впродовж доби величини генерованої активної потужності в значному діапазоні, електроенергетична система повинна розвиватись з урахуванням зростання частки відновлюваних джерел енергії в енергобалансі країни. Тому інтегрування значної потужності вітрових та сонячних електростанцій до складу електроенергетичної системи потребує урахування впливу нестабільного характеру генерації на збалансованість роботи електроенергетичної системи. Виходячи з реальних графіків електричних навантажень, з урахуванням збільшенні частки генерації від ВДЕ до 25%, як це передбачає план розвитку до 2035 року, енергосистема України потребує впровадження систем акумулювання електроенергії на основі водневих накопичувачів загальною потужністю близько 5,6 ГВт.

## Список використаних джерел

- 1 OECD (2019). Enhancing Competitiveness in Ukraine through a Sustainable Framework for Energy Service Companies (ESCOs), OECD Publishing. URL: <https://www.oecd.org/eurasia/countries/Enhancing-Competitiveness-in-Ukraine-throughSustainable-Framework-for-Energy-Service-Companies-2019.pdf>.
- 2 Міністерство енергетики та вугільної промисловості України (2021). Інформація про роботу електроенергетичного комплексу. URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat\\_id=245183225](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=245183225).
- 3 IEA (2019). Coal Information 2019, OECD Publishing. URL: <https://doi.org/10.1787/4a69d8c8-en>.
- 4 IEA (2023). Key energy statistics, 2020. Country profile: Ukraine. URL: <https://www.iea.org/countries/ukraine>.
- 5 Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». URL: [www.zakon.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc](http://www.zakon.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc).
- 6 Palekhova, L. L., Simon, S. (2016). Competitive advantages through the implementation of international energy management standards. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. № 3. С. 42-51.
- 7 Халатов, А. А. (2016). Енергетика України: сучасний стан і найближчі перспективи. *Вісник Національної академії наук України*. № 6. С. 53-61.
- 8 Укрстат: Експрес-випуски – Енергетика. URL: [https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/energ.htm](https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/energ.htm).
- 9 Сайт Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). URL: <http://www.nerc.gov.ua/index.php?id=11889>.
- 10 Енергетичний інформаційно-аналітичний сайт незалежних професіоналів «Kosatka.Media». URL: <https://kosatka.media/>.
- 11 Сайт Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <http://saee.gov.ua/uk>.
- 12 Гаряжа, В. М. (2018). Конспект лекцій з курсу «Електрична частина станцій та підстанцій» (частина 1) (для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Гаряжа, В. М., Карюк, А. О.; Харків. Нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, (149).
- 13 Parkinson, Gi. (2023). Tesla big battery moves from show-boating to money-making. URL: <http://reneweconomy.com.au/tesla-big-battery-moves-from-show-boating-to-money-making-93955/>.
- 14 O'Neil, A. (2018). FCAS in Action – What Happens When a Generator Trips? (or Never let the data get in the way of a good story). Topic: Summer 2017-18 in the NEM. URL: <https://wattclarity.com.au/articles/2018/03/fcas-in-action-what-happens-when-a-generator-trips/>.
- 15 International Energy Agency (2014). Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells. Paris : OECD/IEA.
- 16 Карпенко, О. (2019). Проблеми з СЕС, або «Калифорнійська вуточка» під українським соусом». URL: [https://biz.liga.net/ekonomika/tek/opinion/problemy-s-ses-ili-kaliforniys\\_kaya-utochka-pod-ukrainskim-sousom](https://biz.liga.net/ekonomika/tek/opinion/problemy-s-ses-ili-kaliforniys_kaya-utochka-pod-ukrainskim-sousom).
- 17 Кармазін, О. О. (2019). Балансова надійність електроенергетичних систем в умовах зростання частки відновлюваної енергетики : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.08. Київ.
- 18 Укренерго вперше вимушено обмежити «зелену» генерацію. URL: [https://biz.censor.net.ua/news/3157884/ukrenergo\\_vperve\\_vynujsdenno\\_ogranichilo\\_zelenuyu\\_generatsiyu\\_obnovleno](https://biz.censor.net.ua/news/3157884/ukrenergo_vperve_vynujsdenno_ogranichilo_zelenuyu_generatsiyu_obnovleno).
- 19 Добовий графік виробництва/споживання електроенергії (2021). URL: <https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/dobovuj-grafik-vyrobnystva-spozhyvannya-e-e/>.
- 20 Chen, Ding, et al. (2023). Multiscale Hierarchical Structured NiCoP Enabling Ampere-Level Water Splitting for Multi-Scenarios Green Energy-to-Hydrogen Systems. *Advanced Energy Materials*. 2300499.

## PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF UKRAINE'S POWER SYSTEM

Dmytro Tsyplenkov, Oleksii Bobrov\*

**Keywords:** Electric power industry, power system, electric load schedules, hydrogen storage systems, hydro storage stations, duck curve, renewable energy sources, maneuvering capacity.

**The main objective of** substantiation of the capacity of electric energy regulators in the energy system of Ukraine, taking into account the accelerated growth of connected generating capacities based on renewable energy sources.

**Methodology.** Empirical observation methods were used, which allowed to legitimately reflect the characteristics of the set of considered daily generation schedules of the unified energy system of Ukraine and induction on the basis of an hourly analysis of its characteristic daily schedules.

**Findings.** . If the rate of commissioning of generating capacities from RES is maintained, renewable energy will occupy up to 30% of the country's electricity production market in the next 10 years. However, due to the physical nature of electricity generation by RES systems, which is periodic, it is necessary to provide for the installation and connection of electric power regulators to the energy system of Ukraine. The existing structure of generating sources allows the integration of wind turbines and SPPs in total up to 4 GW without deterioration of balance reliability indicators of UES of Ukraine. For the conversion of electrical energy for its accumulation, the most promising is the use of hydrogen energy. The use of storage capacities will have a positive effect on the cost of electricity for end consumers. The analysis of daily schedules of electric loads of the UES of Ukraine and the performed calculations showed that already today there is a shortage of accumulative capacities in the country within the limits of 1 GW.

**Conclusions and Recommendations.** Taking into account the increase in the share of generation from RES to 25%, as provided for in the development plan until 2035, the energy system of Ukraine needs the implementation of electricity storage systems based on hydrogen storage devices with a total capacity of about 5.6 GW.

---

\***Tsyplenkov Dmytro** – *Cand. Sc (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: Tsyplenkov.d.v@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0002-0378-5400>.*

**Oleksii Bobrov** – *Cand. Sc (Technical), teacher of special and electrical engineering disciplines of the Vocational College of Rocket and Space Engineering of the Dnipro National University named after O. Honchara (in Sum. Associate Professor of the Department of Electrical Engineering), Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: Bobrov.o.v@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0002-1872-8900>.*

## ГЛАВА 9

# УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ В ПРОМИСЛОВОМУ СЕКТОРІ: ДОСВІД ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ ТА УКРАЇНИ

Людмила Палєхова\*

**Анотація.** Глава розкриває зміст концепції енергоефективності в контексті вимірів трилеми енергетичної сталості, показує взаємні впливи показників енергоефективності і досягнення стійкої енергетичної безпеки, енергетичної справедливості і екологічної сталості у процесах виробництва та споживання енергії. Спираючись на статистичні дані аналітичних звітів, визначаються фактори, що сприяють або стримують успіхи країн у показниках енергоефективності і за складовими трилеми енергетичної сталості. Вивчається досвід стандартизації систем енергоменеджменту в Європейському Союзі, демонструючи можливі підходи на прикладі Німеччини. Аналізуються результати масштабних багаторічних проєктів UNIDO/GEF з впровадження стандарту ISO 50001:2018 у промисловості України. За результатами дослідження пропонуються заходи щодо посилення мотивації промислових підприємств до впровадження стандартів енергоменеджменту в повоєнному відновленні.

**Ключові слова:** енергоефективність, енергоспоживання, трилема енергетичної сталості, стандарт енергетичного менеджменту ISO 50001, промисловість, Україна.

### 9.1 Вступ

Вперше роль енергії для сталого розвитку суспільства була зазначена у доповіді ООН «Наше спільне майбутнє» від 1987 року у контексті стурбованості щодо посилення екологічного впливу промислового сектору та загрози виснаження джерел викопного палива [1]. Відтоді концепція сталого енергетичного розвитку поступово набирала чіткості і перетворилася на важливу політичну мету глобального рівня. Багатогранне завдання сучасної енергетичної політики визначено Резолюцією Генеральної Асамблеї ООН від 25 вересня 2015 року «Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року» – забезпечити економічне зростання і сталий розвиток за допомогою екологічно раціонального і безпечного використання енергетичних ресурсів [2]. У рамках цього процесу Європейський Союз поступово розробляє багатовимірну енергетичну стратегію розвитку і впроваджує низку політичних рішень для її реалізації на європейському континенті.

---

\*Палєхова Людмила Львівна – канд. екон. наук, доцент, професор кафедри маркетингу, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна. E-mail: Paliekhova.L.L@ntu.one; <https://orcid.org/0000-0003-0217-5755>.

Зокрема, у 2010 році Єврокомісія публікує резолюцію «Енергія 2020: Стратегія конкурентоспроможної, сталої та безпечної енергетики», яка ставить енергоефективність у центр енергетичної стратегії європейського розвитку до 2020 року, а в 2011 році приймається План дій ЄС щодо підвищення енергоефективності до 2020 року – очікується, що промисловий сектор може досягти щорічного підвищення енергоефективності на 2%. В 2018 році оголошується нова Європейська стратегія сталого розвитку «Чиста планета для всіх – Європейське стратегічне довгострокове бачення процвітаючої, сучасної, конкурентоспроможної та кліматично нейтральної економіки», яка встановила ще більш амбітні цілі – до 2030 року покращити енергоефективність ЄС принаймні на 32,5% [3].

Цінність концепції сталого виробництва і споживання енергії стала особливо очевидною, коли раптово відбулося глобальне лихо – злочинне вторгнення РФ в Україну. Війна завдала масштабні руйнування української промисловості та викликала глибоку енергетичну кризу не тільки в Україні, а й по всій Європі та далеко за її межами. Разом з тим Європейський звіт зі сталого розвитку 2023/2024 підтверджує, що російська агресія та енергетичний шантаж посилили хвилю «зеленого» енергетичного переходу в країнах ЄС та об'єднали прогресивні сили світу проти загальної загрози [4].

Важливі узагальнення містить документ «Відстеження ЦУР 7: Звіт про прогрес у сфері енергетики за 2024 рік»<sup>1</sup> [5]. Експерти констатували, що війна в Україні викликала порушення енергетичних ринків, але водночас призвела до відновлення прогресу енергоефективності, чого не спостерігалось вже два роки. Розуміння значення енергоефективності в підвищенні енергетичної безпеки досягло консенсусу на COP28<sup>2</sup>. В заключному документі саміту серед інших заходів щодо виконання Паризької угоди визначається завдання подвоїти глобальний прогрес у сфері енергетичної ефективності до 2030 року [6]. За розрахунками Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), оскільки середньорічні темпи підвищення енергоефективності в усі роки, крім 2015, були більш низькими, ніж очікувалося, тепер за період з 2022 по 2030 рік щорічний прогрес підвищення енергоефективності має перевищувати 3,8% – це приблизно відповідає Сценарію чистих нульових викидів до 2050 року та угоді COP28 [5].

---

<sup>1</sup>Це спільний звіт, який підготували експерти Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), Статистичного відділу ООН (UNSD), Світового банку і Всесвітньої організації охорони здоров'я (WHO).

<sup>2</sup>Конференція Сторін Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату (2023) – COP28 проходила у Дубаї з 30 листопада по 12 грудня 2023 року. Угода COP28 має на меті посилити заходи для досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року, серед основного – це прискорити відмову від використання вугілля в енергетичних системах та зменшувати первинну енергію щорічно на 1,2% до 2030 року, збільшити втричі глобальні потужності відновлюваної енергетики до 2030 року, швидше впроваджувати технології для уловлювання і зберігання вуглецю там, де складно відмовитися від викопного палива (наприклад, у металургії та цементній промисловості), а також подвоїти глобальний прогрес в енергетичній ефективності до 2030 року [6].



Для вирішення завдань зі збільшення енергоефективності у промисловості, МЕА пропонує низку заходів, серед яких важливе значення приділяється широкому впровадженню прогресивних систем енергоменеджменту (СЕНМ) на основі міжнародного стандарту ISO 50001. Стандарт ISO 50001 має поширити світовий досвід зі зниження енергоспоживання в господарській діяльності та підвищення ефективності використання енергоресурсів. У 2022 році кількість сертифікатів ISO 50001, виданих у всьому світі, зростає майже на 30 відсотків до 28 000 [7].

Незважаючи на війну, що триває, Україна має потужну динаміку реформ, зокрема в енергетичному секторі. Але проблема енергоефективності виробництва залишається однією із самих важких, кількість сертифікованих промислових підприємств на відповідність ISO 50001 значно відстає від європейських. У найкращому за результатами 2021 році в Україні діяло всього 38 сертифікатів, у Німеччині, наприклад, у цей рік було 6166 сертифікатів. У контексті занепокоєння щодо повоєнної розбудови енергетично сталої економіки проблема подолання бар'єрів щодо збільшення енергоефективності у промисловості має велику актуальність.

*Аналіз останніх публікацій.* Тематичний аналіз найбільш вагомих публікацій з питань енергетично сталого розвитку, сучасної політики енергоефективності та досвіду впровадження міжнародних стандартів енергоменеджменту дозволив прийти до основних взаємопов'язаних висновків.

По-перше, вчені згодні, що енергетично сталий розвиток – це багатовимірна концепція управління виробництвом і споживанням енергії, метою якої є досягнення енергетичної безпеки, енергоефективності та зменшення екологічного впливу в усіх галузях діяльності, особливо в промисловій сфері [8-12]. Так Fulya Almaz [10] доводить, що підвищення енергоефективності промислових процесів укріплює одночасно енергетичну незалежність і конкурентоспроможність на цільових ринках.

По-друге, впровадження сучасних систем енергоменеджменту є потужним інструментом постійного нарощування потенціалу енергоефективності [8-13]. Зокрема, Mike Schulze та ін. [12] підтверджують такі висновки, досліджуючи п'ять ключових складових енергетичного менеджменту – планування / стратегія, реалізація / експлуатація, контроль, організація та культура управління. Patrik Thollander та ін. [11] висвітлюють фактори, які перешкоджають або спонукають до успішного впровадження практик енергоефективності в різних галузях промисловості.

По-третє, розвивається тезис, що впровадження міжнародного стандарту енергоменеджменту ISO 50001 є запорукою виконання амбітної стратегії енергетично сталої економіки України, що особливо важливо у повоєнному відновленні української промисловості [8-9; 14-16; 19-21]. Зокрема, Володимир Находов та ін. [16] демонструють це положення на прикладі металургійного виробництва, на яке в Україні припадає друга за величиною частка енергоспоживання та найбільша частка викидів CO<sub>2</sub>.



*Мета дослідження.* Враховуючи складність викликів відновлення української промисловості в контексті імплементації цілей оновленої Європейської енергетичної стратегії до 2030 року, дослідження поглиблює розуміння концепції енергетично сталого розвитку, вивчає досвід Євросоюзу на шляху до високих результатів енергоефективності, доводить можливості та з'ясовує бар'єри для широкого впровадження в промисловому секторі України систем енергоменеджменту за ISO 50001:2018, аналізуючи довоєнний досвід проєктів за підтримки UNIDO/GEF.

*Методика дослідження.* Для здійснення дослідження проведено комплексний огляд академічних, інституційних та офіційних інформаційних ресурсів англійською, німецькою та українською мовами, які відбиралися методом контент-аналізу. Для статистичного аналізу використовувалися офіційні дані та документи, що містять глобальні аналітичні звіти та зведені оцінки з питань енергоефективності, а також статистичні дані Євростату та Державного комітету статистики України.

Аналіз інформації в основному стосувався стану переробної промисловості, зокрема металургійної галузі, що є найбільш енергоємною після енергетичної галузі в ЄС і Україні. У дослідженні також використовуються дані, отримані безпосередньо з веб-сайтів промислових підприємств, а також результати польового дослідження за проєктом «Вивчення проблем енергоменеджменту у промисловості під час війни та повоєнного відновлення», зокрема результати опитування 10 топ-менеджерів підприємств Дніпропетровської області (сертифікованих та не сертифікованих на відповідність ISO 50001), що проводилося в листопаді-грудні 2022 року.

## **9.2 Розуміння концепції енергоефективності в контексті вимірів трилеми енергетичної сталості**

Зміни, що відбулися за останні десятиліття у всьому світі, міцно пов'язали дві концепції – енергетична ефективність і сталий розвиток, що розглядаються взаємозалежними і імплемнтуються разом на всіх рівнях управління для досягнення цілей енергетично незалежного і сталого розвитку економіки [19-22]. МЕА прогнозує, що за відсутності необхідних змін в енергетичній політиці, технологіях та системах менеджменту споживання енергії зросте протягом наступних 30 років майже на 50%<sup>3</sup>.

Нагадаємо, що у вузькому значенні поняття «енергетична ефективність» визначається як індикатор ефективності використання енергії у процесах виконання робіт, виробництва чи споживання, або інших процесах, що вимірюється співвідношенням або іншим кількісним взаємозв'язком між отриманим результатом (на виході) і витраченою енергією у системі виробництва чи споживання (на вході) [7].

---

<sup>3</sup>Див: European Environment Agency (EEA): Energy – efficiency <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/energy-efficiency>.

Проте у Дорожній карті для глобального енергетичного сектора: Net Zero до 2050, презентованій МЕА у 2021 році, підкреслюється, що забезпечення енергетичної ефективності має більш широке значення, а саме підтримувати виміри сталого розвитку на кожному етапі енергетичного ланцюгу (під час виробництва, транспортування, передачі, розподілу, постачання та споживання енергії). Велика відповідальність за здійснення енергетичного переходу покладається на промисловий сектор, що має друге місце після енергетики за величиною споживання енергії і викидів CO<sub>2</sub> [22].

Світова енергетична рада (*англ.* World Energy Council, WEC) пропонує розвивати національні стратегії підвищення енергоефективності через призму енергетичної трилеми (*англ.* energy trilemma), яка включає в себе такі складові: енергетична безпека, енергетична справедливість та екологічна сталість. Вказується, що збільшення енергоефективності у галузях переробної промисловості одночасно підтримують всі три складові енергетичної трилеми, забезпечуючи стале економічне зростання з відносним зменшенням споживання енергії [23-24].

*Енергетична безпека* (*англ.* energy security) розуміється як надійність енергетичної інфраструктури. За визначенням IPCC<sup>4</sup> [25], енергетична безпека включає наступні завдання: забезпечення стійкості та достатності енергопостачання для задоволення національного енергетичного попиту за конкурентоспроможними та стабільними цінами; розвиток сучасних технологій з виробництва та споживання енергії; розвиток інфраструктури для генерації, зберігання та передачі енергії і забезпечення виконання контрактів на постачання для бізнесу, населення та державних потреб.

У 2021 році, за даними Всесвітньої енергетичної ради, рейтинг енергетичної безпеки очолили Канада та США (див. табл. 9.1). Вказані країни мають великі запаси первинних енергоресурсів і не мають стратегії знижувати енергоємність, яка в них майже у два рази вище, ніж в ЄС. Проте Європа через енергетичну кризу, що проявилася внаслідок війни рф в Україні, взяла за мету припинити залежність від російського газу та у 2022 році перейшла на стратегію REPowerEU<sup>5</sup>. Розроблений план дій включає завдання прискорити темпи нарощування енергоефективності в усіх державах-членах, хоча зараз енергоємність ЄС на 42% нижче, ніж у середньому по світу [26].

---

<sup>4</sup>Міжурядова група експертів зі зміни клімату – IPCC (*англ.* The Intergovernmental Panel on Climate Change) – є органом ООН для оцінки питань, пов'язаних зі зміною клімату.

<sup>5</sup>Нещодавно Ramboll Management Consulting (міжнародна інженерна, архітектурна та консалтингова компанія) опублікувала звіт «Energy Policy and Strategy», який провів повторний аналіз енергетичної трилеми в Європі з точки зору політичних завдань нової енергетичної стратегії ЄС. Дискусії та опитування керівників різних відомств з питань енергетики та комунальних послуг показали, що військова агресія рф в Україні спочатку викликала шок, але одразу стала поштовхом до пошуку та розробки більш стійких довгострокових рішень. У відповідях посадовців лунала думка, що для країн Європи сьогодні особливо важливим є впровадження масштабних програм для збільшення енергоефективності і енергозбереження (див.: <https://brandcentral.ramboll.com/share/xRsGFgZS52Xq4iMi3RcJ>).

**Таблиця 9.1** – Топ-10 самих успішних країн за критеріями трилеми енергетичної сталості у 2021 році (Джерело: сформовано на основі даних WEC [23])

Енергетична безпека		Енергетична справедливість		Екологічна сталість	
1 Канада	76.9	1 Люксембург	100.0	1 Швеція	87.5
2 США	74.1	2 Катар	99.9	2 Швейцарія	87.1
3 Фінляндія	73.8	3 Кувейт	99.8	3 Норвегія	85.8
4 Швеція	73.1	3 ОАЕ	99.8	4 Данія	84.7
5 Чеська Республіка	72.9	4 Оман	99.6	5 Уругвай	84.0
6 Німеччина	72.5	4 Ісландія	99.6	6 Франція	83.4
7 Латвія	72.4	5 Бахрейн	99.5	7 Велика Британія	83.2
8 Угорщина	72.1	6 Ірландія	98.6	8 Бразилія	82.8
9 Австрія	71.6	7 Тринідад і Тобаго	98.4	9 Албанія	82.7
10 Велика Британія	70.8	7 Швейцарія	98.4	10 Люксембург	82.1
		8 Ізраїль	98.3		
		9 США	97.3		
		10 Саудівська Аравія	97.2		
		10 Норвегія	97.2		

*Енергетична справедливість* (англ. energy equity) означає здатність забезпечити базовий доступ до енергії, а саме доступ до чистих, надійних і доступних енергетичних послуг для приготування їжі та опалення, освітлення, зв'язку та продуктивного використання (з особливою увагою до принципів справедливості ціни<sup>6</sup>) [24].

Як бачимо з табл. 9.1, у 2021 році більшість лідерів за цим критерієм – це енергетично незалежні країни, що мають можливість запропонувати справедливу ціну. Але перше місце посідає Люксембург, що імпортує десь 99,9% енергетичних ресурсів [23]. Люксембург має найвищий показник ВВП на душу населення серед країн Європи, це дозволяє тримати енергію досить доступною. Однак Люксембург відстає за іншими складовими трилеми: політика «енергетичного туризму» не є надійною; також має екологічні проблеми. За думкою експертів, існуюче забруднення повітря може стати причиною більше 100 смертей громадян країни щорічно<sup>7</sup> [28].

<sup>6</sup>За концепцією «Справедлива торгівля» (англ. fair price) справедлива ціна має два основних критерія: (1) уздовж ланцюга створення вартості підтримується справедлива винагорода учасникам виробництва, що можуть завдяки цього розвиватися на принципах сталого розвитку і пропонувати сталі продукти; (2) покупець достатньо поінформований про характеристики (економічні, екологічні і соціальні) предмету продажу, а також про суттєві особливості процесів його виробництва [28]. Оскільки покупець не зобов'язаний купувати продукт (енергію) у певній компанії за справедливою ціною, яка може бути не самою низькою на ринку, є проблема просування «зелених» виробників та «зелених» продуктів на ринках з високою ціновою конкуренцією.

<sup>7</sup>Див.: <https://luxtoday.lu/ru/luxembourg/zelyonaya-energetika-objdyotsya-lyuksemburgu-v-142-milliarda-evro>.

*Екологічна сталість* (англ. environmental sustainability) зосереджена на аспектах скорочення негативних впливів у процесах виробництва та споживання енергії, а також зменшення використання викопного палива. Показник враховує ефективність використання енергоресурсів, декарбонізацію, викиди вуглекислого газу і метану, а також забруднення повітря на всіх етапах ланцюгу – виробництва, передачі, розподілу та споживання енергії. У заходах екологізації фокусом уваги є розвиток відновлюваних джерел енергії, впровадження енергозберігаючих і низьковуглецевих технологій [24].

По параметру екологічної сталості у 2021 році, як і раніше, домінують європейські країни (див. табл. 9.1). Швеція очолила рейтинг – країна зовсім не має запасів викопного палива і розвивається завдяки самим високим в Європі темпам нарощування потужностей відновлюваної енергетики, зокрема гідроенергетики, вітроенергетики та біоенергетики [23]. Напроти, у 2023 році Китай та Індія разом мали 71% світового споживання вугілля, показники їхньої енергоефективності складають відповідно 0,147 і 0,105 кое/\$15р, тоді як Швеція має показник 0,083 кое/\$15р<sup>8</sup>.

Світова енергетична рада щорічно, починаючи з 2010 року, публікує рейтинги актуальних індексів за трилемою енергетичної сталості (англ. World Energy Trilemma Index), демонструючи тенденції енергоефективності кожної країни у часі<sup>9</sup>. Індекс висвітлює проблеми країн стосовно збалансування енергетичної системи за певними індикаторами сталості. Так, розрахунки індексу за 2021 рік об'єднують близько 60 наборів даних у 30 індикаторів для створення актуального енергетичного профілю для кожної країни. Після розрахунків балів кожна складова трилеми отримує оцінку за чотирма класами – А, В, С та D, де А є найкращим, а D – найгіршим рівнем. Табл. 9.2 демонструє, що можна мати сумарну оцінку ААА і не потрапити в першу десятку, якщо за деякими складовими трилеми країна має відносно низькі оцінки.

Як бачимо, лише небагатьом країнам вдається досягти балансу АААа за усіма параметрами енергетичної трилеми. Деякі країни мають досить високі результати у двох вимірах, але програвають у третьому вимірі або за сумою усіх балів, що віддзеркалює компроміс між енергетичними вимірами. Наприклад, Німеччина має оцінку балансу АААа, проте Норвегія випереджає її за сумою балів, хоча має оцінку балансу ВААа. Природні запаси нафти у деяких країнах надають їм високу стійкість енергопостачання. Однак, як свідчать дослідження, низькі ціни та доступність знижують стимули до енергозбереження та підвищення енергоефективності, погіршуючи екологічну стійкість через високі викиди парникових газів [29-30].

---

<sup>8</sup>За даними Global Energy Transition Statistics – <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-intensity-gdp-data.html>

<sup>9</sup>Розрахунки WEC здійснюються на основі глобальних і національних даних. Аналізи включають рекомендації для кожної країни щодо посилення узгодженості енергетичної трилеми та інтегрованих політичних інновацій в управлінні енергетичними системами.

**Таблиця 9.2** – TOP-10 країн за індексом трилеми енергетичної сталості у 2021 році (Джерело: сформовано на основі даних WEC [23])

Рейтинг індексу енергет. сталості	Назва країни	Оцінка балансу	Сума балів за енергет. трилемою	Рейтинг енергет. безпеки	Рейтинг енергет. справедл.	Рейтинг еколог. сталості
1	Швеція	AAAa	84.3	4	19	1
2	Швейцарія	AAAa	83.4	27	7	2
3	Данія	AAAa	83.3	14	11	4
3	Фінляндія	AAAa	82.7	3	23	13
4	Велика Британія	AAAa	82.4	10	12	7
4	Канада	AAAa	82.3	1	12	26
5	Австрія	AAAa	82.2	9	13	11
6	Франція	AAAa	81.1	13	22	6
6	Норвегія	BAAa	81.0	42	10	3
7	Німеччина	AAAa	80.6	6	20	16
8	Нова Зеландія	AAAa	80.3	18	15	18
9	Словенія	ABAa	78.8	17	18	26
9	Естонія	ABAa	78.7	22	20	21
10	США	AACa	78.5	2	9	56

Індекс енергетичної сталості надає змогу аналізувати сучасні проблеми через призму минулих та існуючих стресів. Вивчення досвіду щодо їх подолання в країнах-лідерах може допомогти в необхідному прискоренні енергетичного переходу та адаптації до нових викликів. Наприклад, цікавим для України є досвід Німеччини – обидві країни не володіють достатніми запасами первинних паливно-енергетичних ресурсів (див. рис. 9.1), водночас Німеччина виробляє ВВП майже в 8 разів більше, а енергоефективність її виробничої сфери майже в 4 рази вище, ніж в Україні [26].

Німеччина наполегливо йде шляхом до вуглецевої нейтральності. І все ж дивує, як швидко держава досягла стабілізації і стратегічної трансформації енергетичного ринку після відмови від споживання російського викопного палива відповідно до REPowerEU-Plan. До 2022 року Німеччина купувала з рф 55% природного газу, понад 50% кам'яного вугілля та близько 35% нафти. Тепер весь цей енергетичний імпорт фактично зведено до нуля. В 2023 році вперше частка ВДЕ зайняла більше половини у загальному виробленні електроенергії; виведення з енергобалансу АЕС та вугільних станцій компенсувалося збільшенням приблизно на 30% використання природного газу; партнерство загальноєвропейського ринку електроенергії, який балансує, дозволило майже в 2,5 рази скоротити оптові ціни на електроенергію.

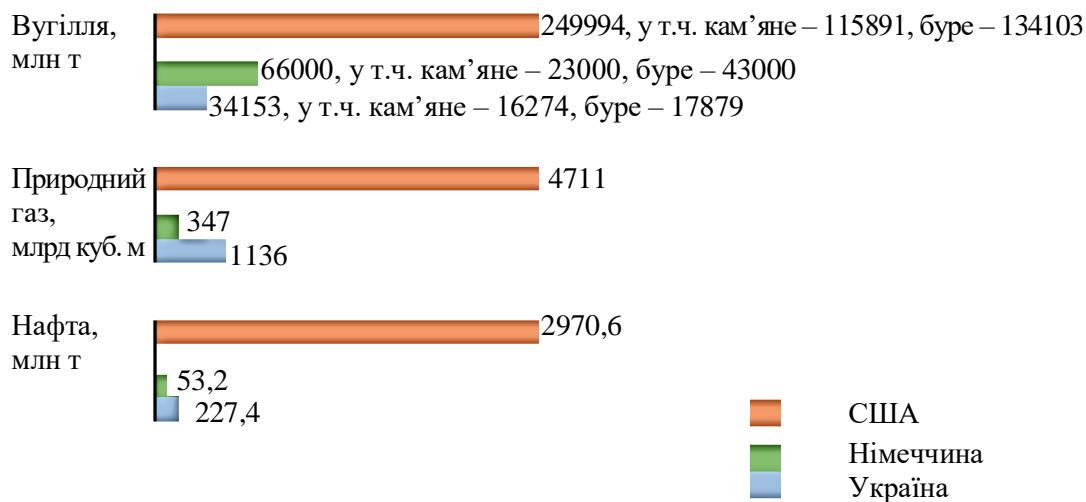


Рисунок 9.1 – Порівняння доведених запасів природних енергетичних ресурсів США, Німеччини та України (Джерело: за даними WEC станом на 2013 р. [28])

Як показано на рис. 9.2, у 2019 році за індексом енергетичної сталості Німеччина посідала 9 місце серед 128 країн. В той же час Україна в цьому рейтингу зайняла 61 місце, зокрема по показнику енергетичної справедливості – 85, екологічної стійкості – 65, але за показником енергобезпеки – почесне 7 місце. До речі, у 2015 році Україна мала 111 місце серед 129 інших країн у рейтингу.

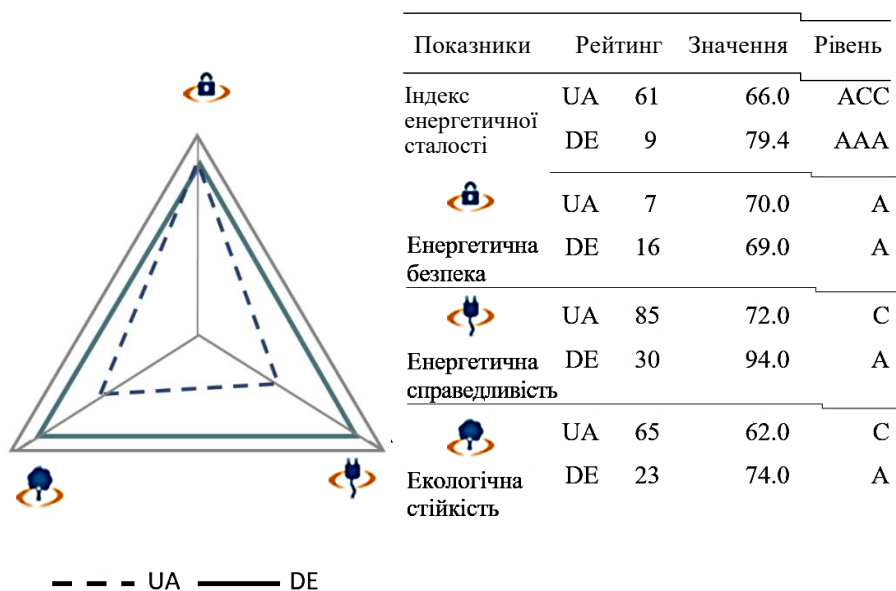


Рисунок 9.2 – Порівняння трилеми енергетичної сталості України і Німеччини, 2019 (Джерело: за даними WEC, 2020 [28])



В 2022 році за індексом енергетичної трилеми Німеччина досягла вже 7 місце з урахуванням всіх показників енергетичної сталості, в той же час Україна в цьому рейтингу піднялася до 43 місця [23]. Але Україну попереду ще чекає велика програма з повоєнного відновлення промислової інфраструктури, що загострює завдання не втрачати темпи енергетичного переходу. Треба розуміти, що країни світу динамічно рухаються вперед за кожним напрямом енергетичної сталості. Зокрема, наприклад, успіхи за показником енергоефективності будуть залежати у тому числі від темпів розвитку технологічних інновацій в галузі енергетики та масштабів посилення впровадження систем енергоменеджменту в інших країнах [29-30].

Отже, основні виклики сучасності, що стосуються досягнення прогресу у підвищенні темпів зростання енергоефективності, полягають у двох напрямках: 1) розширення завдань управління енергоефективністю в контексті економічно ефективного, екологічно чистого і справедливого розвитку енергетичної сфери; 2) широке впровадження найкращих практик і міжнародних стандартів енергоменеджменту на промислових підприємствах, щоб розірвати зв'язок між економічним зростанням та відповідною динамікою зростання споживання енергії.

### **9.3 Досвід впровадження стандартів енергоменеджменту в Європейському Союзі**

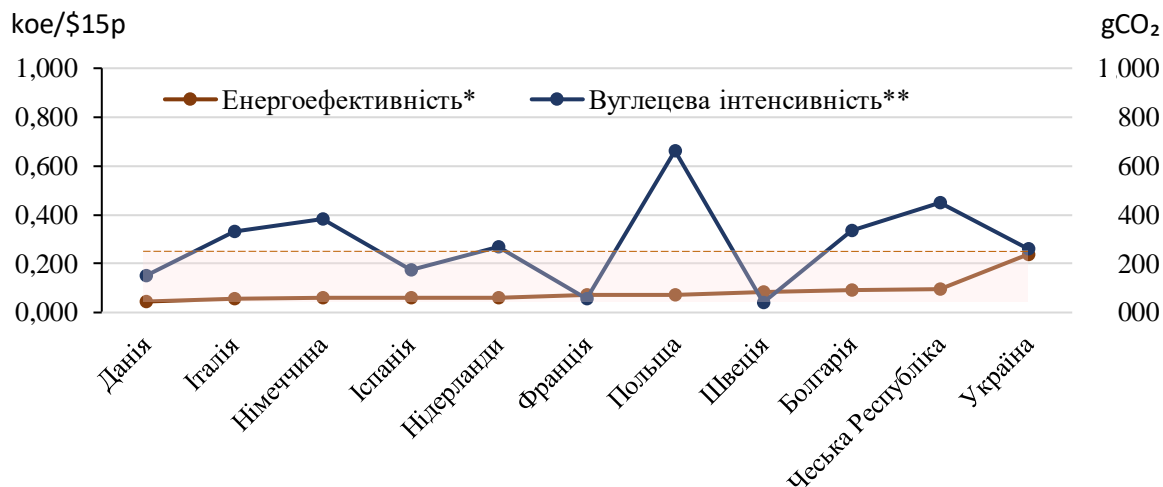
Сталий розвиток енергетики і підвищення енергоефективності є гаслом повоєнної програми відновлення економіки України. Враховуючи перспективи членства в ЄС, країна має досягати більш високих показників енергоефективності та зменшення вуглецевої інтенсивності, щоб відповідати завданням Дорожньої карти ЄС з переходу до конкурентоспроможної і кліматично нейтральної економіки до 2050 року. Підкреслимо, документ встановлює дуже високі енергетичні зобов'язання і визначає підвищення енергоефективності такою ж важливою частиною плану дій, як і відновлювана енергія та диверсифікація енергопостачання<sup>10</sup>.

Водночас, за висновками звіту МЕА за 2020 рік, Україна, незважаючи на значні успіхи за останні роки, «поки не отримала масштабу дій, необхідного для забезпечення енергетично сталого економічного зростання» [29]. Рис. 9.3 демонструє великі розриви по показнику енергетичної ефективності України з іншими країнами ЄС. Але треба зазначити, що Україна досі не ставила перед собою задачу просуватися до європейського рівня енергоефективності, не мала діючої стратегії енергоефективності та належної уваги до проблеми високої енергоємності промислового виробництва.

---

<sup>10</sup>За Дорожньою картою енергетики ЄС 2050 (англ. Energy Roadmap 2050) очікується зниження попиту на енергію на 41% до 2050 року порівняно з піком у 2005-2006 роках (див.: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0885:FIN:EN:PDF>).

## Глава 9 Управління енергоефективністю в промисловому секторі: досвід Європейського Союзу та України



\*за даними Global Energy Transition Statistics: Energy intensity, 2023 (кое/\$15р – кілограм нафтового еквівалента/долар ВВП у постійних цінах 2015 року, за паритетом купівельної спроможності)

\*\*за даними Carbon intensity of electricity generation Ember and Energy Institute, 2023 (gCO<sub>2</sub> – в грамах еквівалентів вуглекислого газу, що викидається на кіловат-годину виробленої електроенергії)

**Рисунок 9.3** – Порівняння показників енергоефективності та вуглецевої інтенсивності в державах-членах ЄС та Україні (Джерело: побудовано автором)

Водночас європейські країни наполегливо розвивали програми та стандарти енергоменеджменту протягом багатьох десятиліть [8]. Наприклад, в Нідерландах ще з 1989 року діє Національний план екологічної політики (NEPP), до якого кожні чотири роки вносяться зміни. Серед іншого у 1992 році був запроваджений комбінований податок на енергію/CO<sub>2</sub>, а також запроваджено програму довгострокових угод (LTA), яка мала за мету підвищення енергоефективності в промисловості. Добровільні довгострокові контракти з підприємствами, що визначають детальні заходи для зменшення споживання енергії, вважаються юридично зобов'язуючою процедурою, вбудованою в процес отримання екологічних дозволів. З 2000 року в Нідерландах діє специфікація енергоменеджменту, яка покликана допомагати компаніям у впровадженні систем енергоменеджменту. Також підприємствам пропонується спрощена процедура отримання екологічних дозволів, субсидій, широкий спектр інформаційної та технічної допомоги [31].

У 2007 році ЄС приймає пакет енергетичних цілей, відомий як ціль «20-20-20» (збільшення частки відновлюваних джерел енергії в загальному споживанні енергії до 20%, підвищення енергоефективності на 20% та зменшення викидів парникових газів на 20%). В рамках цієї стратегії у липні 2009 року вступає в силу перший європейський стандарт по сертифікації енергоменеджменту EN 16001:2009. Загалом ці процеси значно посилили розуміння і важливість СЕНМ в країнах ЄС.

Але, наприклад, для Німеччини, яка вже мала дуже великий набір власних програм і інструментів управління енергоефективністю, було проблемою пов'язати ці регулятори з прийнятим національним стандартом DIN EN 16001. Щоб досягти оптимальної синергії, уряд публікує посібник «Системи енергоменеджменту на практиці», який надає покрокові інструкції з практичними порадами та інформацією<sup>11</sup>.

Стандарт EN 16001 діяв на просторі ЄС до квітня 2012 року поки не було прийнято рішення про визнання міжнародного стандарту ISO 50001 «Система енергоменеджменту». Стандарти EN 16001 і ISO 50001 є дуже схожими, однак все ж відрізняються. Головна відмінність полягає у тому, що ISO 50001 фокусує основну увагу на деталізації опису та конкретизації вихідних даних енергетичної ситуації об'єкту управління. Зокрема, підприємство зобов'язується: на основі вимірювань та інших даних аналізувати використання енергії; за результатами аналізу виявляти зони значного використання енергії та визначати можливості покращення енергоефективності [15].

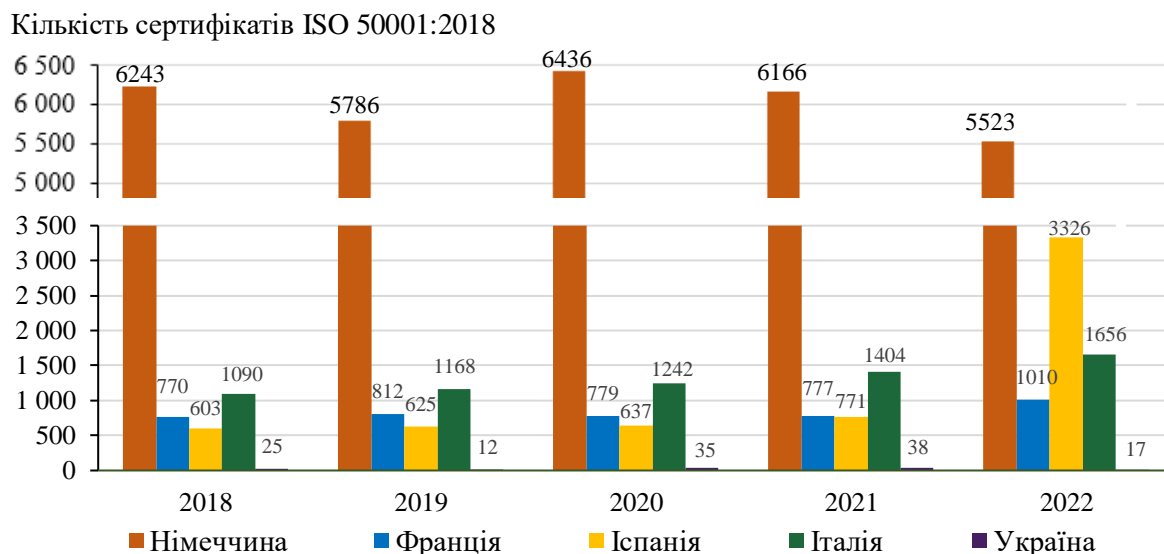
Поряд із цим, ISO 50001 замінює поняття «енергетичного аспекту», що було в EN 16001, цілим рядом визначень, які в сукупності описують досліджуваний феномен. Організація СЕНМ будується на основі принципу нескінченного вдосконалення процесу енергозбереження, тобто по циклу Демінга: «планування, виконання, контроль, реакція», що застосовується в інших стандартах – ISO 9001 та ISO 14001. Також ISO 50001 висуває вимоги, щоб методологія, яка використовується, була зафіксована і надалі враховувалася під час регулярних оцінок енергетичних результатів.

Оновлена версія стандарту ISO 50001 була опублікована в 2018 році. Поправка була спрямована на адаптацію стандарту до єдиної базової структури для усіх стандартів систем управління за ISO («гармонізована структура»). Тепер ISO 50001 має однакову структуру текстів і загальноприйнятні базові визначення, що й стандарти управління якістю ISO 9001 та управління навколишнім середовищем ISO 14001. Це дозволяє підприємствам краще пов'язувати різні системи управління [18].

Протягом 2018-2022 років лідером впровадження ISO 50001:2018 постійно була Європа, на яку припадає близько 40% всіх діючих сертифікатів; найбільшу кількість сертифікатів отримали підприємства металургійної, харчової та хімічної промисловості. За 2022 рік найбільшого зростання у відсотках зазнала Іспанія – 431%, що стала другою в Європі за кількістю діючих сертифікатів на відповідність ISO 50001:2018 – 3326 сертифікатів, перше місце посіла Німеччини – 5523 сертифікатів (див. рис. 9.4). Успіхи двох країн пояснюються впровадженням численних механізмів підтримки, що пропонують компаніям прямі або опосередковані економічні вигоди, наприклад: в Німеччині – повернення податків, в Іспанії – умови участі в багатьох державних тендерах.

---

<sup>11</sup>Див: DIN EN 16001: Energiemanagement systeme in der Praxis. Ein Leitfaden für Unternehmen und Organisationen.



**Рисунок 9.4** – Порівняння показників кількості сертифікатів на відповідність ISO 50001:2018 в державах-членах ЄС та Україні, станом на 31.12.2022 (Джерело: побудовано за даними [7; 26] )

Енергетична політика Німеччини демонструє неймовірні результати, що показові для держав всього світу. Споживання первинної енергії у 2020 році порівняно з 2008 роком скоротилося майже на 17%, але поставлено ще більш амбітна ціль – до 2050 року енергоспоживання має зменшитися на 50%. Вагомим фактором успіху є велика увага до розгорнутої інформаційної та організаційної підтримки. Так, у червні 2012 року уряд публікує посібник «Системи управління енергією на практиці для компаній і організацій». Після прийняття DIN EN ISO 50001:2018 версія посібника була переглянута, враховуючи зобов'язання підприємств проводити енергетичні аудити на основі Закону про енергетичні послуги<sup>12</sup>. Для підприємств, які не мають досвіду впровадження енергетичного стандарту, пропонується програма «пробного запуску системи управління енергією». До того ж схеми енергетичної сертифікації служать ексклюзивною альтернативою обов'язковому енергетичному аудиту для компаній, до яких це вимагається Директивою ЄС 2012/27/EU [31].

Треба зазначити, що програми федеральної підтримки ISO 50001:2018 реалізуються одночасно за підтримки регіональних енергетичних агентств, які надають безкоштовні консультації. Зокрема, Саксонське енергетичне агентство – SAENA GmbH землі Саксонія<sup>13</sup> особливо допомагає середнім компаніям в отриманні Saxon Commercial Energy Pass (або SägeP), який розкриває потенціал підприємства щодо енергозбереження.

<sup>12</sup>Див.: Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen (EDL-G). Ausfertigungsdatum: 04.11.2010. Zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 13.11.2023 I Nr. 309.

<sup>13</sup>Див.: Ihre Landesenergie-agentur für Sachsen – <https://www.saena.de/>.

Директива (ЄС) 2023/1791 Європейського Парламенту та Ради від 13 вересня 2023 року «Про енергоефективність та внесення змін до Регламенту (ЄС) 2023/955»<sup>14</sup> запроваджує принцип «енергоефективність перш за все» в енергетичній та неенергетичній політиці. Директива зобов'язує підприємства із середньорічним споживанням понад 85 ТДж впроваджувати тільки систему енергоменеджменту, а підприємства, які мають енергоспоживання більше 10 ТДж, але менше 85 ТДж – впроваджувати СЕНМ або енергетичний аудит. Раніше тільки великі підприємства, незалежно від рівня споживання енергії, повинні були впроваджувати СЕНМ або енергоаудит. Публікація стала завершальним кроком у законодавчому процесі, який розпочався в липні 2021 року в рамках пакету «Fit for 55». У травні 2022 року цей акт отримав доповнення, що враховують вимоги плану REPowerEU (щодо відмови від російського викопного палива). Україна також зобов'язується імплементувати Директиву ЄС про енергоефективність у рамках Угоди про асоціацію з ЄС.

#### **9.4 Досвід впровадження стандарту ISO 50001:2018 у промисловості України**

Треба зазначити, що Україна поступово впроваджувала актуальні версії міжнародного стандарту ISO 50001, що підтримувалося багатьма проектами UNIDO/GEF. Так, у 2015 році Україна приймає гармонізований стандарт ДСТУ ISO 50001:2014, IDT «Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосування», що ідентичний ISO 50001:2011 «Energy management systems-Requirements with guidance for use». У 2015-2016 роках в Україні було введено в дію ще 5 гармонізованих стандартів цієї ж серії, що стосуються питань процедури проведення енергетичного аудиту, сертифікації систем енергетичного менеджменту та вимірювання рівня досягнутої чи досяжної енергоефективності.

У зв'язку з введенням нової версії міжнародного стандарту ISO 50001:2018 «Energy management systems – Requirements with guidance for use», що анулював попередню версію, в 2019 році національним технічним комітетом зі стандартизації ТК-48 «Енергозбереження» було підготовлено проєкт гармонізованого стандарту ДСТУ ISO 50001:2020 (ISO 50001:2018, IDT) «Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання», який набув чинності з 15 вересня 2020 року.

---

<sup>14</sup>Директива з енергоефективності (ЄС) 2023/1791 набула чинності в жовтні 2023 року. Зокрема, Директива (ЄС) 2023/1791 встановлює юридично мету ЄС щодо скорочення кінцевого споживання енергії в ЄС на 11,7% до 2030 року (порівняно з базовим сценарієм 2020 року). Це включає вимогу до країн-членів встановити свої індикативні національні внески на основі об'єктивних критеріїв відповідно до національних обставин (див.: Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast). Official Journal of the European Union L 231 of 20 September 2023.169615/EU XXVII.GP).

Одночасно набули чинності інші стандарти цієї серії, а саме ДСТУ ISO 50007:2020 (ISO 50007:2017, IDT) «Енергетичні послуги. Настанова щодо оцінювання та поліпшення енергетичних послуг для споживачів» та ДСТУ ISO 50047:2020 (ISO 50047:2016, IDT) «Енергозбереження. Визначення обсягів енергозбереження в організаціях».

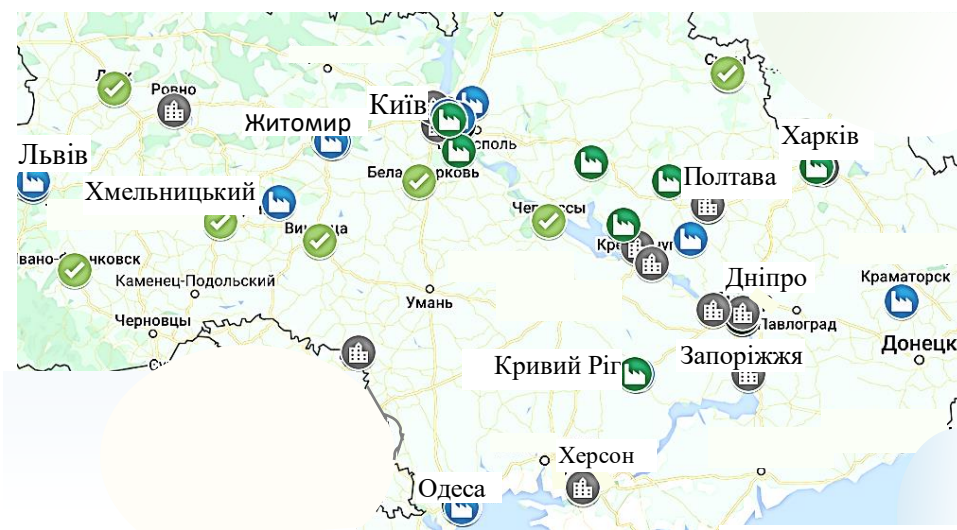
З метою прискорення впровадження нового стандарту протягом 2015-2021 років виконувався Проєкт UNIDO/GEF «Впровадження стандарту систем енергоменеджменту в промисловості України», який включив низку різних програм фінансової та іншої підтримки. Особливістю є те, що в промисловості України приблизно 60% від усієї енергії в секторі споживають великі підприємства. Тому саме великі промислові компанії та холдинги стали фокусом уваги проєкту з впровадження СЕНМ ISO 50001 [32].

Програми проєкту UNIDO стартували у 2015 році. Зокрема, в різних містах України проводилася велика кількість тренінгів та семінарів для підготовки провідних аудиторів, експертів та національних тренерів з СЕНМ ISO 50001 [18; 29]. Для досягнення цілей проєкту Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України, Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України та Центр ресурсоефективності та чистого виробництва виступили фасилітаторами координації. Глобальний екологічний фонд (GEF) виділив 5,5 мільйона доларів на виконання проєкту. Крім того, 30 червня 2020 року UNIDO та ПАТ Банк «УКРГАЗБАНК» (Україна) підписали договір про започаткування Фонду гарантування кредитів на суму 1,5 млн доларів США як спеціального фінансового механізму для допомоги великим промисловим компаніям у впровадженні систем енергоменеджменту за ISO 50001 та інших заходів з енергоефективності.

Результати були вражаючими: близько 30 найбільших українських компаній по всій Україні прийняли участь у проєкті, серед них 7 підприємств успішно впровадили систему енергоменеджменту за ДСТУ ISO 50001:2020, зокрема металургійний гігант – АрселорМіттал Кривий Ріг, цукрові заводи агропромислового холдингу «Астарта-Київ», Харківський машинобудівний завод «Світло Шахтаря» («Согум Group») та інші компанії (див. рис. 9.5). З метою розвитку експертного потенціалу України у сфері енергоменеджменту в промисловості за різними програмами було підготовлено більше 250 фахівців різного рівня: енергоменеджери підприємств, експерти органів сертифікації тощо.

Водночас проєкт довів, що поліпшення ситуації енергоефективності тільки на деяких підприємствах, хоча і великих, не вирішує проблему енергетичної сталості виробництва у цілому. Потрібна система розгалужених дій на державному рівні, яка включає й адаптацію національного законодавства до енергетичного та кліматичного законодавства ЄС. Також проблему енергоефективності треба розглядати у комплексі завдань енергетичної трилеми – досягнення енергетичної безпеки, енергетичної справедливості і екологічної сталості у процесах виробництва та споживання енергії [29].





26 органів сертифікації було підготовлено і відкрито

15 компаній впровадили СЕНМ за підтримки проекту

21 компанія розпочала підготовку до впровадження СЕНМ за підтримки проекту

7 компанії впровадили СЕНМ ISO 50001 за підтримки проекту

**Рисунок 9.5** – Географія результатів проекту UNIDO/GEF «Впровадження стандарту систем енергоменеджменту в промисловості України», листопад 2020  
(Джерело: складено за [33])

У листопаді 2021 році ПРООН та Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України підписали Меморандум про співробітництво у сфері розбудови ринку зеленого фінансування, підвищення енергоефективності та енергетичної безпеки в контексті Енергетичної стратегії України до 2035 року<sup>15</sup>. Насамперед приймається перший прямий законодавчий акт, спрямований на імплементацію положень Директиви 2012/27/ЄС про енергетичну ефективність – Закон України від 21 жовтня 2021 року № 1818-IX «Про енергетичну ефективність», що регулює відносини у сфері забезпечення енергетичної ефективності у контексті завдань цілей енергетично сталого економічного розвитку (ст.2, п.1).

Повномасштабна війна в Україні створила нові виклики, зокрема енергоємні підприємства, що особливо чутливі до збоїв на енергетичних ринках, у першу чергу відчули необхідність трансформації системи енергоменеджменту вже зараз.

<sup>15</sup> Див.: <https://www.undp.org/uk/ukraine/press-releases/proon-zapustyla-novyy-proyekt-dlya-pidtrymky-vidnovlennya-ukrayiny-ta-staloho-rozvytku>.

Так, результати нашого опитування енергетичних служб металургійних підприємств в Дніпропетровській області у кінці 2022 року підтвердили однорідність думок щодо проблем і заходів «стратегії енергетичного порятунку», а саме: 1) металурги вказують, що інноваційний розвиток підприємств є сьогодні складним, але технологічні інновації вкрай необхідні, незважаючи на воєнні ризики та нестачу фінансів; 2) впровадження енергоменеджменту на основі ISO 50001:2018 було визнано одним з ключових заходів щодо зниження поточних ризиків; 3) керівники розуміють необхідність удосконалення енергоменеджменту, але є проблема нестачі знань та цільової практичної підтримки з боку держави; 4) враховуючи перспективи впровадження енергетичного аудиту та посилення енергетичної звітності, можливо, необхідне створення енергетичних мереж та спеціальних консультативних органів.

## **9.5 Висновки і рекомендації**

Є цілком очевидним, що війна РФ проти України радикально змінила енергетичні ринки та концепцію управління енергоспоживанням. Проблема енергоефективності невід’ємно пов’язана з контекстом трилеми енергетичної сталості у рамках Європейської зеленої угоди. Для України подолання відставання у показниках енергоефективності в промисловому секторі є довгостроковою інвестицією в енергобезпеку економіки. Вивчення досвіду країн-членів ЄС, зокрема Німеччини, показало, що проблема енергоефективності промислового виробництва має здійснюватися в рамках цілісної державної концепції підвищення відповідальності підприємств за енергоспоживання та викиди в навколишнє середовище. Водночас необхідно шукати та розвивати гнучкі інструменти мотивації енергоефективності.

Загальне очікування полягає в тому, що посилення прихильності до систем енергоменеджменту за ISO 50001:2018 призведе до суттєвого зниження споживання енергії в промисловості країни та сприяння беззуглецевому розвитку за її межами – в європейських ланцюгах створення вартості. Масштабні довоєнні проекти, підтримані UNIDO/GEF, надали флагманам української промисловості безцінний досвід, який продемонстрував переваги впровадження системи енергетичного менеджменту на основі ISO 50001. А енергетична криза, спричинена війною, довела, що ігнорувати проблему низької енергоефективності небезпечно, для виживання і розвитку потрібні інноваційні енергетичні рішення і нові підходи до політики енергоефективності.

Для металургійного сектору, вважаємо, було б корисно скористатися досвідом Німеччини та Швейцарії у створенні промислових енергетичних мереж, які сприяють поширенню досвіду з питань енергоефективності. Ці мережі можуть включати урядових або неурядових консультантів, щоб продемонструвати зацікавленим сторонам наявні можливості в реальному часі для підвищення енергоефективності.

## Список використаних джерел

- 1 Our Common Future (1987). Report of the World Commission on Environment and Development. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>.
- 2 Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року (2015). Резолюція Генеральної Асамблеї ООН від 25 вересня 2015 року, A/RES/70/1. URL: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/Agenda2030-UA.pdf>.
- 3 Gunnarsdóttir, I., Davidsdóttir, B., Worrell, E., & Sigurgeirsdóttir, S. (2021). Sustainable energy development: History of the concept and emerging themes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110770.
- 4 Europe Sustainable Development Report 2023/2024. Published by Dublin University Press Dublin, Ireland, 2024. URL: <https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2024/europe-sustainable-development-report-2023-24.pdf>.
- 5 Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2024. A joint report of the custodian agencies: the International Energy Agency, the International Renewable Energy Agency, the United Nations, the World Bank, and the World Health Organization. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cdd62b11-664f-4a85-9eb6-7f577d317311/SDG7-Report2024-0611-V9-highresforweb.pdf>
- 6 Decision -/CMA.5 Outcome of the first global stocktake. The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement. UN Climate Change Conference - United Arab Emirates Nov/Dec 2023. URL: <https://unfccc.int/documents/636584>.
- 7 Energy Efficiency 2023. International Energy Agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dfd9134f-12eb-4045-9789-9d6ab8d9fbf4/EnergyEfficiency2023.pdf>.
- 8 Palekhova, L. L., Simon, S. (2016). Competitive advantages through the implementation of international energy management standards. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, (3), 42-51.
- 9 Shvets, V., Palekhova, L., Palekhov, D., & Simon, S. (2018). Energy efficiency criteria as a focus for market-driven strategies of large companies in transition economies. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (6), 157-164.
- 10 Almaz, F. (2021). Energy oriented management approach as a market activity tool in achieving competitive advantage. In *Strategic Approaches to Energy Management: Current Trends in Energy Economics and Green Investment* (pp. 231-241). Cham: Springer International Publishing.
- 11 Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020). Introduction to industrial energy efficiency: energy auditing, energy management, and policy issues. Academic Press.
- 12 Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., & Thollander, P. (2016). Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *Journal of cleaner production*, 112, 3692-3708.
- 13 Li, J., Dai, J., Issakhov, A., Almojil, S. F., & Souri, A. (2021). Towards decision support systems for energy management in the smart industry and Internet of Things. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107671.
- 14 Palekhova L., Palekhov D. (2018) Anwendung von Energieeffizienz-kriterien für Marktstrategien von Großunternehmen in den Transformationsländern. *Energieeffizienz im Bau und Maschinenwesen*. Eds.: K. Fraña, S. Simon, J. Grunewald. Technische Universität in Liberec, 44-53.
- 15 Brych, V., & Tkach, M. (2023). Energy management: DSTU ISO 50001: 2020 and conditions of martial law. *Ekonomichnyy analiz*, 33(4), 192-201.
- 16 Находов, В. Ф., Бориченко, О. В., & Чернявський, А. В. (2022). Формування стратегії підвищення енергоефективності металургійних підприємств як запоруки декарбонізації економіки України.

- 17 Zakari, A., Khan, I., Tan, D., Alvarado, R., & Dagar, V. (2022). Energy efficiency and sustainable development goals (SDGs). *Energy*, 239, 122365.
- 18 Чернявський, А. В., Іншеков, Є. М., Соловей, О. І., Бориченко, О. В., & Пертко, П. П. (2021). Керівництво з впровадження системи енергетичного менеджменту відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 50001: 2018.
- 19 Palekhova, L., Palekhov, D. (2018). Anwendung von Energieeffizienzkriterien für Marktstrategien von Großunternehmen in den Transformationsländern. *Energieeffizienz im Bau und Maschinenwesen [Herausgeber: Fraña, K., Simon, S., Grunewald, J.]*. Technische Universität in Liberec, 44-53.
- 20 Palekhov, D., Palekhova, L. (2018). Methodical approaches to increasing the energy efficiency of global value chains. *Naukovyi Visnyk NHU*. № 6. ISSN 2071-2227. DOI: 10.29202/nvngu/2018/22 URL: [http://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2018/06/06\\_2018\\_Palekhov.pdf](http://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2018/06/06_2018_Palekhov.pdf).
- 21 Shvets, V., Paliikhova, L. (2021). Managing sustainability via balancing the energy trilemma. *Sustainability in the industrial sector: Proceedings of the Study Seminar at NTU Dnipro Polytechnic - BTU Cottbus-Senftenberg, 24th Dec. 2020 - 18th Jan. 2021*. [Ed.: Shvets, V., Paliikhova, L.]. Dnipro-Cottbus: Accent, 49-56.
- 22 Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency, Special Report.2021.
- 23 World Energy Council (2022): World Energy Trilemma Index 2021. In partnership with Oliver Wyman. Cornhill London EC3V 3NH.
- 24 World Energy Council (2020): World Energy Trilemma Index 2019. Cornhill London EC3V 3NH. World Energy Council.
- 25 IPCC (2022). Annex I: Glossary. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.020.
- 26 Global Energy Transition Statistics: Energy intensity. URL: <https://yearbook.enerdata.net>.
- 27 World Energy Outlook 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.
- 28 Палєхова, Л. Л. (2020). Управління сталим розвитком: довідник базових понять. Дніпро: НТУ «Дніпровська Політехніка», (332).
- 29 Paliikhova, L., Palekhov, D. (2022). Energy efficiency as prerequisite of competitive strategy for large industrial enterprises: Lessons of the UNIDO / GEF Project in Ukraine. *Sustainable production and consumption in industry: challenges and opportunities. Collection of scientific articles*. Ed.: Shvets V., Paliikhova L. Dnipro-Cottbus: Accent, 122-130
- 30 Palekhov D., Palekhova L. (2021). Environmental sustainability in achieving the sustainable production and consumption: challenges of a Post-Soviet transition economy. *Transposition of the Acquis Communautaire – Migration and Environment*. Umweltrecht in Forschung und Praxis 66. Verlag Dr. Kovač, Hamburg.
- 31 Energiemanagement als Erfolgsfaktor International vergleichende: Analyse von Energiemanagementnormen (2010). Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und reaktorsicherheit. Förderkennzeichen 3708 13 101 UBA-FB 00141.
- 32 Churikanova, O., Tararin, A. (2021). Energy saving and energy efficiency principles for policymaking in industry. Shvets V., Paliikhova L. (Eds.) *Sustainability in the industrial sector: Proceedings of the Study Seminar at NTU Dnipro Polytechnic - BTU Cottbus-Senftenberg, 24th Dec. 2020 - 18th Jan. 2021*. Dnipro-Cottbus: Accent, 2021 (103-108).
- 33 UNIDO/GEF (2020). Project “Introduction of Energy Management System Standard in Ukrainian Industry”. URL: <http://www.ukriec.org.ua/en/2020/26-listpada-2020-vidbulas-onlayn-konfere>.
- 34 Farriani F, Gazzani A. The Ukraine invasion and the energy crisis: comparative advantages in equity valuations. VoxEu/CEPR; 2023. Available at: <https://cepr.org/voxeu/columns/ukraine-invasion-and-energy-crisis-comparative-advantages-equity-valuations>.

**ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT IN THE INDUSTRIAL SECTOR:  
EXPERIENCE OF THE EUROPEAN UNION AND UKRAINE**

**Ludmila Paliekhova\***

**Keywords:** energy efficiency, energy consumption, Energy Sustainability Trilemma, energy management system based on ISO 50001, industry, Ukraine.

**The main objective** of this study was to deepen the understanding of the concept of energy sustainable development, to study the experience of the European Union, and identify opportunities and barriers to high energy efficiency results in Ukraine.

**Methodology.** Applied methods include the following: analysis of the official EU documents, statistical reports from international non-governmental organisations, and scientific publications on the subject of energy efficiency in the context of sustainable development; comparative analysis of statistics in the area of energy consumption, energy efficiency and economic growth in various regions and countries; as well as analysis of the experience of different countries in this field, with a particular focus on Germany.

**Findings.** Strengthening Ukraine's energy efficiency in the context of the Energy Sustainability Trilemma is a long-term investment in post-war reconstruction of the industrial sector on the principles of the European Green Deal. Studying the experience of advanced countries of the European Union, especially Germany, showed that the algorithm for improving the energy efficiency in the industrial complex should be carried out within the framework of an integral state concept to increase the responsibility of industrial enterprises for energy consumption and emissions into the environment. At the same time, it is necessary to search for and develop flexible tools for motivating energy efficiency, especially in large energy-intensive industries such as metallurgy. In this direction, large-scale pre-war projects, supported by UNIDO/GEF, gave the flagships of the Ukrainian industry incredible experience, which showed them the benefits of implementing an energy management system based on ISO 50001. And the energy crisis caused by the war, pushed large enterprises to believe that the energy transition is inevitable.

**Conclusions and Recommendations.** In the case of Ukraine, we believe it would be useful to establish industrial energy efficiency networks that work to facilitate the exchange of information and experience, and can facilitate energy reporting and cooperation in setting energy savings targets. These networks can include government or non-government consultants to show existing capabilities in real time to improve energy efficiency to stakeholders. The experience of Germany can be taken as a basis.

---

\***Ludmila Paliekhova** – Associate Professor, Professor of the Department of Marketing, Dnipro University of Technology, Dmitry Yavornytsky Av., 19, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: Paliekhova.L.L@nmu.one; <https://orcid.org/0000-0003-0217-5755>.



## ГЛАВА 10

# СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

**Руслан Багач\***

**Анотація.** В главі аналізуються питання існуючих станцій швидкої зарядки для електромобілів. Досліджується станція швидкої зарядки з активним випрямлячем. Запропонована зарядна станція не містить додаткового кола перетворення енергії DC / DC перетворювача, що обумовлює меншу кількість стадій перетворення енергії і кращі показники ефективності. В якості AC / DC перетворювача пропонується використовувати активний випрямляч. Запропонована структура зарядної станції електромобілів, яка складається з вхідного трансформатора, трирівневого активного випрямляча та навантаження. До переваг запропонованої зарядної станції з активним випрямлячем відносяться високий коефіцієнт потужності, близький до одиниці; низький коефіцієнт гармонічних спотворень споживаного струму ( $\text{THD} < 5\%$ ); можливість забезпечення двосторонньої передачі енергії. Передбачається, що одноступенева структура зарядної станції має на 2% вище ККД в порівнянні з традиційною двоступеневою структурою.

**Ключові слова:** зарядна станція, одноступенева структура, двоступенева структура, трифазний активний випрямляч, коефіцієнт потужності, широтно-імпульсна модуляція.

### 10.1 Вступ

*Постановка проблеми.* З ростом кількості електромобілів важливим питанням є створення енерго-ефективних зарядних станцій та систем зарядних станцій електромобілів, до яких пред'являються вимоги високого ККД, коефіцієнта потужності близького до одиниці, вимоги до показників електромагнітної сумісності та низького рівня емісії вищих гармонік, а також можливість реалізації режиму швидкого заряду електромобілів. В існуючих зарядних пристроях електромобілів виникає ряд технічних питань: великі втрати потужності, високий рівень емісії вищих гармонік до живлячої мережі та проблеми з реалізацією режиму швидкого заряду. Тому є актуальним питанням покращення показників енергоефективності зарядних станцій, а саме зниження втрат потужності, зниження рівня емісії вищих гармонічних спожитого струму, забезпечення високого коефіцієнта потужності зарядної станції, а також можливості працювати в режимі регульованого джерела струму та регульованого джерела напруги для забезпечення швидкого режиму заряду.

---

\*Багач Руслан Володимирович – аспірант, асистент кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна. E-mail: bagach.ruslan@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>.



Зарядний пристрій електромобіля використовується для швидкої зарядки постійним струмом. Для користувача електромобіля бортові зарядні пристрої є зручними, тому що дозволяють заряджати акумулятори від загальнопромислової мережі. Але бортовий зарядний пристрій, який стаціонарно встановлений на електромобілі, збільшує вагу електромобіля і споживає більше електроенергії під час руху. Для підтримки ефективності роботи електромобіля потрібний компактний зарядний пристрій з високою питомою потужністю [1-2].

Традиційна зарядна станція швидкої зарядки, як правило, складається з двох частин, а саме перетворювача AC / DC і вихідного перетворювача DC / DC. Вихідну напругу можна регулювати відповідно до широкого діапазону напруги акумулятора від 280 В до 400 В для різних електромобілів. У комерційних швидких зарядних пристроях вихідний перетворювач постійного струму призначений для використання в якості перетворювача з гальванічною розв'язкою, де для ізоляції необхідний високочастотний трансформатор. Однак ефективність такої зарядної станції менша внаслідок присутності кола DC / DC [3].

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Вивченню питань, пов'язаних з якістю електричної енергії та енергоефективності зарядних станцій для електромобілів, присвячені роботи українських науковців: Нерубацький В.П., Плахтій О. А., Машура А. В., Кудря С.О., Павлов В.Б., Каплун В.В., Войтко С.В., Васько П.Ф., Лежнюк П.Д., Новський В.О., а також закордонні науковці: Лі Вонг (Li Wong), Ньян Лін Аунг (Nyan Linn Aung), група науковців на чолі з Д. Расоломмпіонона (D. Rasolomampionona), Дж. Р. Чандра Моулі (G. R. Chandra Mouli) та ін. Крім того, низка вітчизняних і закордонних науковців вивчають питання застосування воднево-кисневих паливних елементів та використання в якості джерела живлення установок на основі відновлюваних джерел енергії: Ткаленко Д.А., Солонін Ю.М., Максвелл А. Мур (Maxwell A. Moore), Мануелем Гьотцем (Manuel Götz), Ф. З. Аулі (F.Z.Aouali), Ф. Дж. Піно Луцена (F.J. Pino Lucena) та ін.

Для поліпшення електромагнітної сумісності системи зарядної станції для електромобілів з суміжними електроустановками та підвищення якості енергії живлення зарядної станції для електромобілів можливе використання систем пасивної фільтрації. Однак такі системи забезпечують тільки подавлення гармонік з частотами вище основної частоти перетворювального агрегату і не дозволяють якісно вирішити проблему подавлення низькочастотних неканонічних гармонік. Крім того системи пасивної фільтрації не дозволяють забезпечити коефіцієнт потужності близький до одиниці. Таким чином, в даній главі розглядається дослідження як було обрано як напрямок вирішення проблеми підвищення енергоефективності системи зарядної станції електромобілів шляхом запропонування топології яка забезпечує відносно відомих технічних рішень зарядних станцій покращення параметрів ККД, коефіцієнта потужності та коефіцієнта гармонічних спотворень.

Отримані результати пояснюються тим, що запропонована зарядна станція реалізує одноетапне перетворення електроенергії в активному випрямлячі з корекцією коефіцієнта потужності.

*Метою цього дослідження є підвищення (покращення) енергетичних показників та параметрів електромагнітної сумісності перетворювачів зарядних станцій електромобілів з живлячою мережею шляхом використання активних випрямлячів з корекцією коефіцієнта потужності. Предмет дослідження – трифазний активний випрямляч зарядної станції електромобілів.*

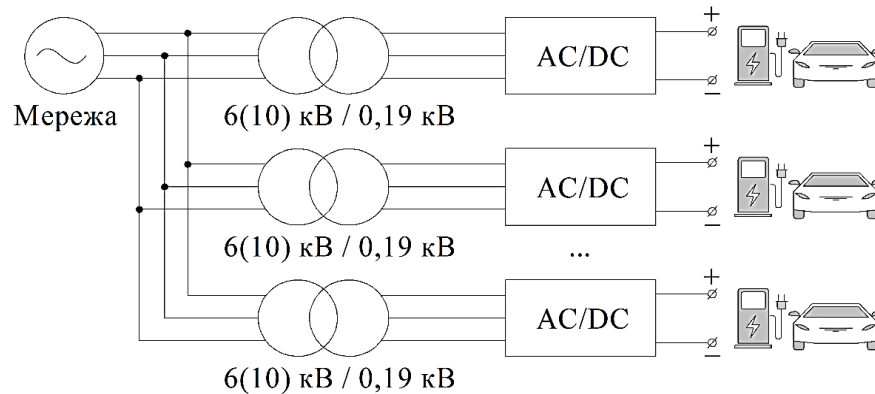
Для досягнення поставленої мети по підвищенню ефективності системи зарядних станцій необхідно вирішити наступні завдання:

- запропонувати схему перетворювальної системи заряду для електромобілів;
- створити математичну модель трифазного активного випрямляча напруги з широтно-імпульсною модуляцією;
- розробити уточнюючу математичну модель, яка описує зарядно-розрядні характеристики літій-іонних накопичувачів з урахуванням струму заряду та температури. Отримані вирази підтвердити фізичним дослідом;
- виконати синтез регулятора вихідної напруги та вихідного струму активного випрямляча зарядної станції;
- визначити фізичний досвід з визначення зарядно-розрядної характеристики батарей NCR-18650b.

## **10.2 Запропонована схема перетворювальної системи заряду для електромобілів**

Зовнішній зарядний пристрій електромобіля використовується при режимі зарядки електромобіля по типу Mode 4 і застосовується для швидкої зарядки постійним струмом. Для користувача електромобіля бортові зарядні пристрої є зручними, тому що дозволяють заряджати акумулятори від загальнопромислової мережі. Однак, бортовий зарядний пристрій збільшує об'єм і вагу електромобіля і споживає більше електроенергії при реалізації руху. Для підтримки ефективності роботи електромобіля потрібний компактний зарядний пристрій з високою питомою потужністю [4].

Традиційна зарядна станція швидкої зарядки, як правило, складається з двох стадій, а саме перетворювача AC / DC і вихідного перетворювача DC / DC (див. рис. 10.1). Отже, вихідну напругу можна регулювати відповідно до широкого діапазону напруги акумулятора 280 - 400 В для різних електромобілів [4].



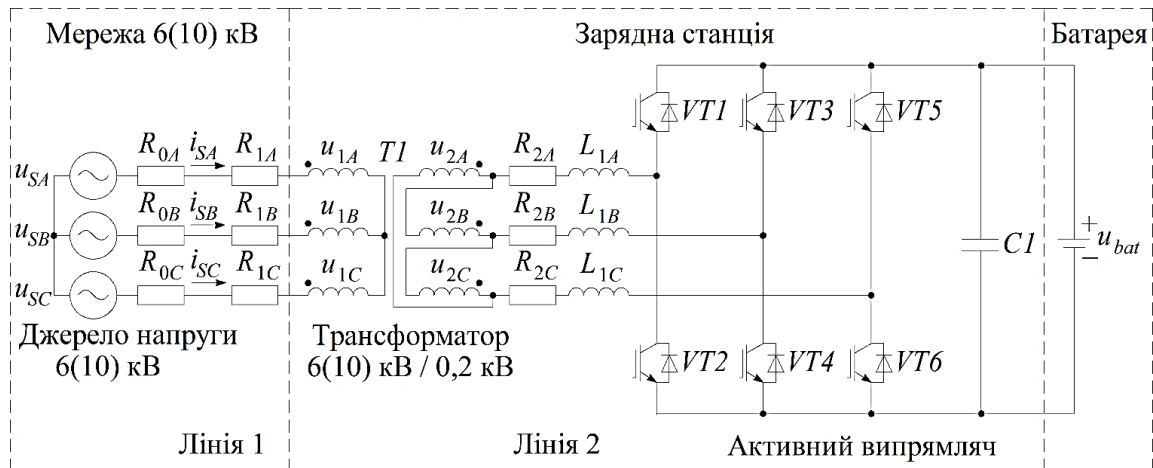
**Рисунок 10.1** – Схема зарядної станції з одноетапним перетворенням енергії  
(Джерело: [4])

У комерційних швидкісних зарядних пристроях вихідний перетворювач постійного струму призначений для використання в якості перетворювача з гальванічною розв'язкою, де для ізоляції необхідний високочастотний трансформатор. Однак ефективність такої зарядної станції менше за рахунок присутності ланки DC / DC [4]. Запропонована одноступенева структура AC / DC замінює двоступеневу структуру з більш низькою вартістю і більшою ефективністю.

В якості AC / DC-перетворювача зарядної станції пропонується активний трифазний чотириквADRANTНИЙ випрямляч з корекцією коефіцієнта потужності. При цьому активний випрямляч може бути побудований за дворівневою схемою. Передбачається, що одноступенева структура має на 2 % вище ККД в порівнянні з традиційною двоступеневою структурою [4-5]. Запропоновану топологію зарядної станції для електромобілів наведено на рис. 10.2 [5]. До переваг запропонованої зарядної станції з використанням дворівневого чотириквADRANTНОГО активного випрямляча відносяться:

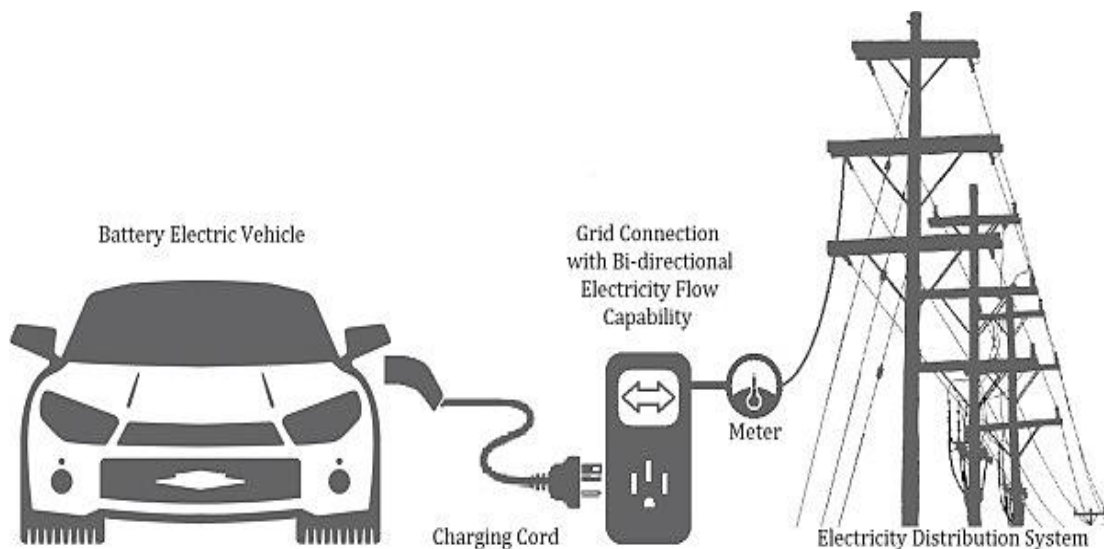
- високий коефіцієнт потужності, близький до одиниці;
- низький коефіцієнт гармонічних спотворень споживаного струму (THD < 5 %);
- більш високий ККД відносно двоступеневих зарядних станцій типу AC / DC – DC / DC;
- можливість забезпечення двосторонньої передачі енергії.

Крім цього, на відміну від раніше розглянутих топологій запропонована зарядна станція не містить додаткової ланки перетворення енергії DC / DC перетворювача, що обумовлює меншу кількість стадій перетворення енергії і кращі показники енергоефективності.



**Рисунок 10.2** – Схема зарядної станції для електромобілів з використанням дворівневого чотириквADRантного активного випрямляча (Джерело: [4])

Американський науково-дослідний інститут електроенергії (EPRI) займається розробкою технічних рішень, що дозволять виконати інтеграцію акумуляторних батарей електромобілів до електричних розподільних мереж в якості інтелектуальних накопичувачів. Глобально, така концепція двосторонньої передачі електроенергії від електромобіля до електричної мережі отримала назву «Vehicle to Grid» або аббревіатура V2G (див. рис. 10.3).



**Рисунок 10.3** – Реалізація технічного рішення V2G<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Див.: <https://www.linkedin.com/pulse/exploring-vehicle-grid-v2g-technology-piyush-rajan/?trackingId=3a4G2TLxShyD3L5jsTweIlg%3D%3D>.

Vehicle to Grid (V2G) – це концепція, яка дозволяє електромобілям вводити енергію в мережу, може також сприяти стабілізації незбалансованих ситуацій у години пік або навіть забезпечувати електричну енергію для аварійного резервування під час відключення електроенергії. Електромобілі підключені до однієї електричної мережі налаштовуються таким чином, щоб стати розподіленим енергетичним ресурсом, тобто енергетичним буфером.

Електромобілі та зарядні станції для них – це новий напрям у широкій системі розподілення енергетичними ресурсами, який є актуальним для систем з імпульсною (змінною) генерацією електроенергії, таких як сонячних фотоелектричних систем, малотужних вітрових турбін, газових мікротурбін та інших розподільних генерацій. Таким чином, електромобіль може бути сховищем та підвищувати рівень енергії в системі електрозабезпечення [6]. Найбільш вагомим бар'єром на шляху до реалізації внеску програм V2G є відсутність інфраструктури, яка б стимулювала посилення прийняття електромобілів і деякого опору комунальних підприємств використовувати електромобілі, так як вони не володіють ними.

Отже здатність двонаправленого потоку енергії призводить до ефективного розподілу як генерованої, так і споживаної електричної енергії. Швидка зарядка постійного струму є кращою для впровадження архітектури V2G в мікромережу через швидку передачу електроенергії, необхідну при використанні електроживлення для накопичення енергії. Також шина постійного струму може використовуватися для інтеграції відновлюваних джерел генерації в систему [7].

### **10.3 Математична модель трифазного активного випрямляча напруги з широтно-імпульсною модуляцією**

Для розробки відповідного перетворювача для будь-якої установки важливо добре розбиратися в деталях установки. Подання об'єкта в математичній формі призводить до зручності аналізу і проектування перетворювача. У цьому розділі представлено математичну модель трифазного ШІМ - перетворювача джерела напруги змінного струму в постійний для несиметричних робочих умов.

Щоб точно описати поведінку ШІМ - випрямляча при несиметричній напрузі живлення, важливо мати справу з вхідними напругами прямої послідовності і вхідними напругами зворотної послідовності окремо.

Порівнюючи з традиційними підходами до моделювання ШІМ - випрямляча в , в цьому розділі пропонується нова математична модель в позитивних і негативних обертових синхронних координатах. Актуальним є дослідження гармонік парного порядку при напрузі проміжного контуру і гармонік непарного порядку на стороні лінії струмів в незбалансованих режимах роботи.

Оскільки більшість схем керування, пропонувані для усунення гармонік в напрузі кола постійного струму, засновані на регулюванні миттєвого потоку потужності перетворювача активного випрямляча, необхідно мати чітке уявлення про миттєву потужність при несиметричній напрузі живлення [8]. У цьому розділі досліджується прямий взаємозв'язок між миттєвою вихідною потужністю і пульсаціями напруги кола постійного струму. Крім того, аналітичне дослідження миттєвого потоку потужності дає пояснення виникнення гармонік непарного порядку в струмах на стороні мережі трифазного випрямляча з ШІМ в незбалансованих робочих умовах [9-10]. На рис. 10.4 наведено конфігурацію силового кола трифазного перетворювача напруги змінного струму в постійній з ШІМ.

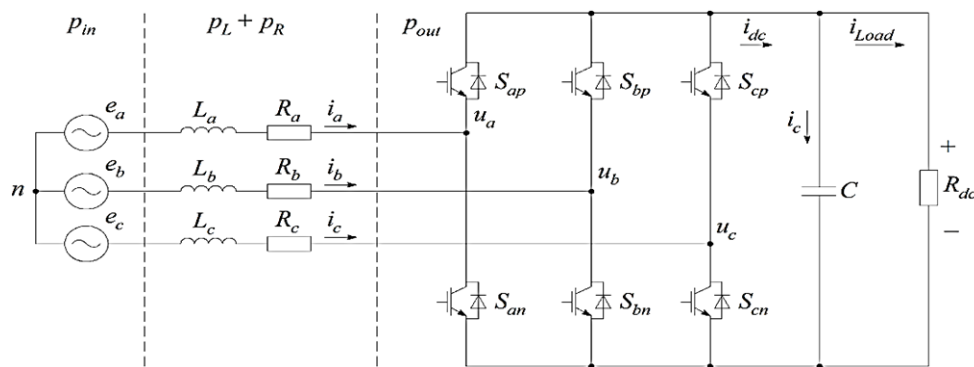


Рисунок 10.4 – Схема перетворювача трифазного джерела напруги АС - DC з ШІМ (Джерело: [10])

Передбачається, що перетворювач живить резистивне навантаження. Диференціальні рівняння для фазних напруг на стороні мережі змінного струму можуть бути виражені як

$$e_a = L \frac{di_a}{dt} + R \cdot i_a + u_{an}; \quad (10.1)$$

$$e_b = L \frac{di_b}{dt} + R \cdot i_b + u_{bn}; \quad (10.2)$$

$$e_c = L \frac{di_c}{dt} + R \cdot i_c + u_{cn}. \quad (10.3)$$



З огляду на те, що сума фазних струмів у трифазній системі дорівнює нулю,  $i_a + i_b + i_c = 0$ , група рівнянь 10.1–10.3 може бути спрощена до дворядкових рівнянь напруги:

$$e_{ab} = e_a - e_b = L \frac{di_a}{dt} - L \frac{di_b}{dt} + R \cdot i_a - R \cdot i_b + u_{an} - u_{bn}; \quad (10.4)$$

$$e_{bc} = e_b - e_c = L \frac{di_b}{dt} - L \frac{di_c}{dt} + R \cdot i_b - R \cdot i_c + u_{bn} - u_{cn}. \quad (10.5)$$

Відповідно до принципів перетворювача джерела напруги співвідношення між напругами на клеммах і середніми сигналами перемикачів може бути виражено як:

$$u_{an} = S_a \cdot u_{dc}; \quad (10.6)$$

$$u_{bn} = S_b \cdot u_{dc}; \quad (10.7)$$

$$u_{cn} = S_c \cdot u_{dc}. \quad (10.8)$$

Отже, рівняння 10.4 - 10.5 можуть бути зведені в матричний формат:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} \\ -\frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} \end{bmatrix} \cdot e + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot u, \quad (10.9)$$

де:

$$x = [i_a \quad i_b]^T;$$

$$e = [e_{ab} \quad e_{bc}]^T;$$

$$u = [S_a \quad S_b]^T.$$

Лінійні напруги  $e_{ab}$ ,  $e_{bc}$ , вхідні струми  $i_a$ ,  $i_b$  і середні функції перемикачів  $S_a$ ,  $S_b$  можуть бути замінені на  $e_\alpha$ ,  $e_\beta$ ,  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  і  $S_\alpha$ ,  $S_\beta$  відповідно з використанням відповідних форм перетворення.

Дана модель може бути представлена в стаціонарній нерухомій  $\alpha$ - $\beta$  системі координат, як:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot e + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot u, \quad (10.10)$$

$$\text{де: } x = \begin{bmatrix} i_{\alpha} & i_{\beta} \end{bmatrix}^T;$$

$$e = \begin{bmatrix} e_{\alpha} & e_{\beta} \end{bmatrix}^T;$$

$$u = \begin{bmatrix} S_{\alpha} & S_{\beta} \end{bmatrix}^T.$$

Незбалансована змінна трифазної системи може бути розділена на три змінні в трифазних збалансованих системах, а саме, складову прямої послідовності, складову зворотної послідовності і складову нульової послідовності.

Оскільки нейтральна точка на рис. 10.1 не підключена до негативного боку шини постійного струму, компонент нульової послідовності відсутній. Таким чином, просторовий вектор неврівноважених трифазних змінних в стаціонарній системі  $\alpha\beta$  може бути представлений як сума просторових векторів компонентів позитивної послідовності  $x_{\alpha\beta}^p$  і негативної  $x_{\alpha\beta}^n$ , компонентів послідовності  $xn \alpha\beta$ , як наведено на рис. 10.5.

Отже, модель трифазного випрямляча з ШІМ може складатися з однієї частини в позитивній системі координат  $\alpha\beta$ , а іншої – в негативній системі координат  $\alpha\beta$ :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{\alpha}^p \\ \dot{i}_{\beta}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha}^p \\ i_{\beta}^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{\alpha}^p \\ e_{\beta}^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{\alpha}^p \\ S_{\beta}^p \end{bmatrix}; \quad (10.11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{\alpha}^n \\ \dot{i}_{\beta}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha}^n \\ i_{\beta}^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{\alpha}^n \\ e_{\beta}^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{\alpha}^n \\ S_{\beta}^n \end{bmatrix}. \quad (10.12)$$

Оскільки рівняння прямої і зворотної послідовності в підвищувальних випрямлячах з ШІМ складають ортогональну систему рівнянь, ці дві системи рівнянь можуть виконувати перетворення окремо.

Як показано на рис. 10.5, просторові вектори  $x_{\alpha\beta}^p$  і  $x_{\alpha\beta}^n$  можуть бути перетворені в систему координат  $d$ - $q$  позитивного і негативного синхронного обертання.

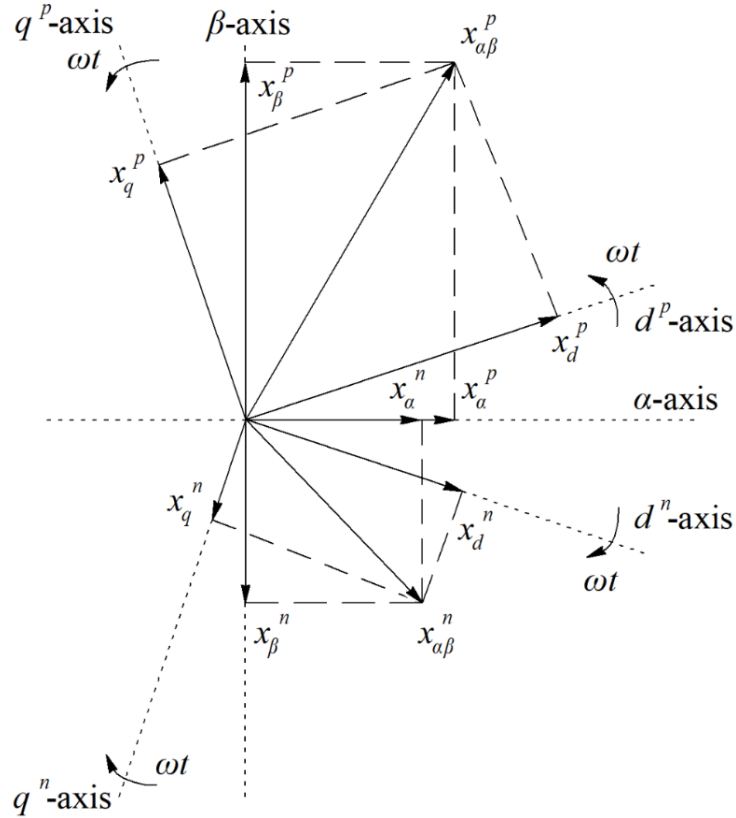


Рисунок 10.5 – Діаграма незбалансованих трифазних змінних  
(Джерело: зроблено автором)

Отже, модель прямої послідовності в просторі станів для трифазного ШІМ-випрямляча в синхронній системі  $d$ - $q$  обертання з позитивним обертанням може бути отримана з виразу 10.10 :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d^p \\ \dot{i}_q^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d^p \\ i_q^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_d^p \\ e_q^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_d^p \\ S_q^p \end{bmatrix}. \quad (10.13)$$

Точно так рівняння зворотної послідовності можуть бути отримані в синхронній системі координат  $d$ - $q$  з негативним обертанням:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d^n \\ \dot{i}_q^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d^n \\ i_q^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_d^n \\ e_q^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{u_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{u_{dc}}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_d^n \\ S_q^n \end{bmatrix}. \quad (10.14)$$

З рис. 10.2 можна отримати рівняння стану на стороні кола постійного струму і записати його в такий спосіб:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_{Load} = i_{dc} - \frac{u_{dc}}{R_{dc}}. \quad (10.15)$$

Струм кола постійного струму  $i_{dc}$  може бути виражений через вхідні фазні струми  $i_a, i_b, i_c$  і середні функції перемикачів  $S_a, S_b, S_c$  як:

$$i_{dc} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c. \quad (10.16)$$

Після застосування перетворення Кларка струм кола постійного струму може бути виражений в нерухомій системі координат  $\alpha$ - $\beta$  як:

$$i_{dc} = S_\alpha \cdot i_\alpha + S_\beta \cdot i_\beta. \quad (10.17)$$

Грунтуючись на векторній діаграмі на рис.10.5, можна виразити струм  $\vec{i}_s$  в форматі просторового вектора, потім перетворити його в обертальну синхронну систему координат  $d$ - $q$  і визначити  $\theta$  як  $\omega t$ :

$$\begin{aligned} \vec{i}_s &= i_\alpha + j \cdot i_\beta = (i_\alpha^p + j \cdot i_\beta^p) + (i_\alpha^n + j \cdot i_\beta^n) = e^{j\theta} \cdot (i_d^p + j \cdot i_q^p) + e^{-j\theta} \cdot (i_d^n + j \cdot i_q^n) = \\ &= (\cos \theta \cdot i_d^p - \sin \theta \cdot i_q^p + \cos \theta \cdot i_d^n + \sin \theta \cdot i_q^n) + j \cdot (\sin \theta \cdot i_d^p + \cos \theta \cdot i_q^p - \sin \theta \cdot i_d^n + \cos \theta \cdot i_q^n) \end{aligned} \quad (10.18)$$

Таким же чином можна перетворити середні функції перемикачів  $S_\alpha, S_\beta$ :

$$\begin{aligned} S_\alpha + j \cdot S_\beta &= e^{j\theta} \cdot (S_d^p + j \cdot S_q^p) + e^{-j\theta} \cdot (S_d^n + j \cdot S_q^n) = \\ &= (\cos \theta \cdot S_d^p - \sin \theta \cdot S_q^p + \cos \theta \cdot S_d^n + \sin \theta \cdot S_q^n) + \\ &+ j \cdot (\sin \theta \cdot S_d^p + \cos \theta \cdot S_q^p - \sin \theta \cdot S_d^n + \cos \theta \cdot S_q^n). \end{aligned} \quad (10.19)$$

Вирази для  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$ ,  $S_\alpha$  і  $S_\beta$  можуть бути отримані з дійсної та уявної частин:

$$i_\alpha = \cos \theta \cdot i_d^p - \sin \theta \cdot i_q^p + \cos \theta \cdot i_d^n + \sin \theta \cdot i_q^n; \quad (10.20)$$

$$i_\beta = \sin \theta \cdot i_d^p + \cos \theta \cdot i_q^p - \sin \theta \cdot i_d^n + \cos \theta \cdot i_q^n; \quad (10.21)$$

$$S_\alpha = \cos \theta \cdot S_d^p - \sin \theta \cdot S_q^p + \cos \theta \cdot S_d^n + \sin \theta \cdot S_q^n; \quad (10.22)$$

$$S_\beta = \sin \theta \cdot S_d^p + \cos \theta \cdot S_q^p - \sin \theta \cdot S_d^n + \cos \theta \cdot S_q^n. \quad (10.23)$$

Підставляючи вирази 10.20 - 10.23 в 10.17, струм  $i_{dc}$  на стороні кола постійного струму можна виразити як:

$$\begin{aligned} i_{dc} &= i_\alpha \cdot S_\alpha + i_\beta \cdot S_\beta = \\ &= (i_d^n \cdot \cos 2\theta + i_q^n \cdot \sin 2\theta + i_d^p) \cdot S_d^p + (i_q^n \cdot \cos 2\theta - i_d^n \cdot \sin 2\theta + i_q^p) \cdot S_q^n + \\ &+ (i_d^p \cdot \cos 2\theta - i_q^p \cdot \sin 2\theta + i_d^n) \cdot S_d^n + (i_q^p \cdot \sin 2\theta + i_d^p \cdot \cos 2\theta + i_q^n) \cdot S_q^n. \end{aligned} \quad (10.24)$$

Коли випрямляч з ШІМ працює в збалансованому стані, тобто всі змінні в зворотній послідовності дорівнюють нулю, можна записати:

$$\dot{i}_{dc} = -\frac{1}{C \cdot R_{dc}} \cdot u_{dc} + \frac{1}{C} \cdot (i_d^p \cdot S_d^p + i_q^p \cdot S_q^p). \quad (10.25)$$

Напругу в колі постійного струму можна представити як:

$$C \dot{u}_{dc} = -\frac{u_{dc}}{R_{dc}} + \begin{bmatrix} i_d^n \cdot \cos 2\theta + i_q^n \cdot \sin 2\theta + i_d^p \\ i_q^n \cdot \cos 2\theta - i_d^n \cdot \sin 2\theta + i_q^p \\ i_d^p \cdot \cos 2\theta - i_q^p \cdot \sin 2\theta + i_d^n \\ i_d^p \cdot \sin 2\theta + i_q^p \cdot \cos 2\theta + i_q^n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_d^p \\ S_q^p \\ S_d^n \\ S_q^n \end{bmatrix}. \quad (10.26)$$

У збалансованому стані  $i_d^p$  і  $i_q^p$  включають тільки постійні значення в стійкому стані. Тому вираз 10.25 вказує, що  $u_{dc}$  містить тільки величину постійного струму, і це рівняння відповідає звичайному рівнянню при збалансованих робочих умовах:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = (i_d^p \cdot S_d^p + i_q^p \cdot S_q^p) - i_{dc}. \quad (10.27)$$

Більш того, рівняння 10.26 дає більше деталей і більш ясну картину про модель випрямляча з ШІМ в незбалансованому робочому стані:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = (i_d^p \cdot S_d^p + i_q^p \cdot S_q^p + i_d^n \cdot S_d^n + i_q^n \cdot S_q^n) - \frac{u_{dc}}{R_{dc}}. \quad (10.28)$$

Рівняння 10.26 показує наявність гармонічної складової другого порядку на виході випрямляча через наявність складових зворотної послідовності як в струмі, так і в середній функції перемикачів  $i_d^n, i_q^n, S_d^n, S_q^n$ .

На практиці умови несиметричного живлення часто виникають в мережі, особливо в слабкій системі змінного струму. Це може бути викликано однофазними навантаженнями в системі, які нерівномірно розподілені між трьома фазами, або несиметричними опорами обмотки трансформатора або передачі, розімкнутої зіркою, розімкненим трикутником і т. п.

Незалежно від причин продуктивність трифазного випрямляча з ШІМ погіршується через появу напруги зворотної послідовності в умовах несиметричної вхідної напруги. Щоб зберегти всі переваги випрямляча з ШІМ в несиметричних робочих умовах, необхідно розуміти, яким чином компоненти зворотної послідовності напруги живлення генерують гармоніки другого порядку при напрузі постійного струму.

Як правило, напруги живлення  $e_a, e_b$  і  $e_c$  від мережі можуть бути розділені як складові прямої послідовності  $e_a^p, e_b^p, e_c^p$  і компоненти зворотної послідовності  $e_a^n, e_b^n, e_c^n$ . Компоненти зворотної послідовності як за струмом, так і за середньою функцією перемикачів  $i_d^n, i_q^n, S_d^n, S_q^n$ .

З огляду на, що середні функції перемикачів постійні  $S_d^n, S_q^n, S_d^p, S_q^p$ , струми зворотної послідовності і середня функція перемикачів викличуть гармонічну складову другого порядку при напрузі проміжного контуру. Відповідно, складові гармоніки другого порядку в напрузі проміжного контуру викличуть гармоніку другого порядку в струмах на стороні змінного струму  $i_d^n, i_q^n, i_d^p, i_q^p$ , що призводить до вищих гармонік парного порядку при постійній напрузі.



Отже, бічні струми змінного струму в позитивній та негативній  $i_d^n, i_q^n, i_d^p, i_q^p$  синхронних обертових системах координат будуть включати всі гармоніки парного порядку, які можна записати як:

$$i_d^p(t) = I_{d0}^p + \sum_{h=2k, k=1} I_{dh}^p \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_{dh}^p); \quad (10.29)$$

$$i_q^p(t) = I_{q0}^p + \sum_{h=2k, k=1} I_{qh}^p \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_{qh}^p); \quad (10.30)$$

$$i_d^n(t) = I_{d0}^n + \sum_{h=2k, k=1} I_{dh}^n \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_{dh}^n); \quad (10.31)$$

$$i_q^n(t) = I_{q0}^n + \sum_{h=2k, k=1} I_{qh}^n \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_{qh}^n), \quad (10.32)$$

де:  $I_{d0}^p, I_{q0}^p, I_{d0}^n, I_{q0}^n$  – змінні, що представляють собою величину постійного струму на стороні змінного струму;

$\phi_{dh}^p, \phi_{qh}^p, \phi_{dh}^n, \phi_{qh}^n$  – фазові кути гармонічних складових  $h$ -го порядку бічних струмів прямої та зворотної послідовності в обертальній системі координат  $d$ - $q$  відповідно.

Отже, постійний струм  $i_{dc}$  може мати гармоніки парного порядку, які можна виразити як:

$$i_{dc}(t) = I_0 + \sum_{h=2k, k=1} I_{rh} \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_{ih}), \quad (10.33)$$

де:  $I_0$  – величина постійного струму;

$I_{rh}$  – амплітудні кути гармонічних складових  $h$ -го порядку в струмі проміжного кола;

$\phi_{ih}$  – фазові кути гармонічних складових  $h$ -го порядку в струмі проміжного кола.

Насправді, амплітуда вищих гармонічних складових змінного струму на стороні мережі буде зменшуватися зі збільшенням порядку гармоніки. Отже, щоб спростити процес проходження змінного струму  $i_d^n, i_q^n, i_d^p, i_q^p$  враховуються тільки гармоніки другого порядку. Відповідно, постійний струм  $i_{dc}$  на стороні постійного струму буде включати гармоніку четвертого порядку:

$$i_{dc}(t) = I_0 + I_{r2\sin} \cdot \sin(2 \cdot \omega t) + I_{r2\cos} \cdot \cos(2 \cdot \omega t) + I_{r4\sin} \cdot \sin(4 \cdot \omega t) + I_{r4\cos} \cdot \cos(4 \cdot \omega t); \quad (10.34)$$

$$I_{r2\sin} = I_{r2} \cdot \cos \phi_{i2}; \quad (10.35)$$

$$I_{r2\cos} = I_{r2} \cdot \sin \phi_{i2}; \quad (10.36)$$

$$I_{r4\sin} = I_{r4} \cdot \cos \phi_{i4}; \quad (10.37)$$

$$I_{r4\cos} = I_{r4} \cdot \sin \phi_{i4}. \quad (10.38)$$

Величину постійного струму  $I_0$  можна записати як:

$$I_0 = S_d^p \cdot I_{d0}^p + S_q^p \cdot I_{q0}^p + S_d^n \cdot I_{d0}^n + S_q^n \cdot I_{q0}^n + \frac{1}{2} \cdot S_d^p \cdot (I_{d2}^n \cdot \sin \theta_{d2}^n + I_{q2}^n \cdot \cos \theta_{q2}^n) + \frac{1}{2} \cdot S_q^p \cdot (I_{q2}^n \cdot \sin \theta_{q2}^n - I_{d2}^n \cdot \cos \theta_{d2}^n) + \frac{1}{2} \cdot S_d^n \cdot (I_{d2}^p \cdot \sin \theta_{d2}^p - I_{q2}^p \cdot \cos \theta_{q2}^p) + \frac{1}{2} \cdot S_q^n \cdot (I_{q2}^p \cdot \sin \theta_{q2}^p + I_{d2}^p \cdot \cos \theta_{d2}^p). \quad (10.39)$$

Амплітуди гармонічних складових другого і четвертого порядку для членів  $\sin$  і  $\cos$ ,  $I_{r2\sin}$ ,  $I_{r2\cos}$ ,  $I_{r4\sin}$  і  $I_{r4\cos}$  можуть бути представлені, відповідно, як:

$$I_{r2\sin} = S_d^p \cdot I_{q0}^n - S_q^p \cdot I_{d0}^n - S_d^n \cdot I_{q0}^p + S_q^n \cdot I_{d0}^p + S_d^p \cdot I_{d2}^p \cdot \cos \phi_{d2}^p + S_q^p \cdot I_{q2}^p \cdot \cos \phi_{q2}^p + S_d^n \cdot I_{d2}^n \cdot \cos \phi_{d2}^n + S_q^n \cdot I_{q2}^n \cdot \cos \phi_{q2}^n; \quad (10.40)$$

$$I_{r2\cos} = S_d^p \cdot I_{q0}^n + S_q^p \cdot I_{d0}^n + S_d^n \cdot I_{q0}^p + S_q^n \cdot I_{d0}^p + S_d^p \cdot I_{d2}^p \cdot \sin \phi_{d2}^p + S_q^p \cdot I_{q2}^p \cdot \sin \phi_{q2}^p + S_d^n \cdot I_{d2}^n \cdot \sin \phi_{d2}^n + S_q^n \cdot I_{q2}^n \cdot \sin \phi_{q2}^n; \quad (10.41)$$

$$I_{r4\sin} = \frac{1}{2} \cdot S_d^p \cdot (I_{d2}^n \cdot \cos \phi_{d2}^p + I_{q2}^n \cdot \sin \phi_{q2}^p) + \frac{1}{2} \cdot S_q^p \cdot (I_{q2}^n \cdot \cos \phi_{q2}^p - I_{d2}^n \cdot \sin \phi_{d2}^p) + \\ + \frac{1}{2} \cdot S_d^n \cdot (I_{d2}^p \cdot \cos \phi_{d2}^p - I_{q2}^p \cdot \sin \phi_{q2}^p) + \frac{1}{2} \cdot S_q^n \cdot (I_{q2}^p \cdot \cos \phi_{q2}^p + I_{d2}^p \cdot \sin \phi_{d2}^p). \quad (10.42)$$

$$I_{r4\cos} = \frac{1}{2} \cdot S_d^p \cdot (I_{d2}^n \cdot \sin \phi_{d2}^n - I_{q2}^n \cdot \cos \phi_{q2}^n) + \frac{1}{2} \cdot S_q^p \cdot (I_{q2}^n \cdot \sin \phi_{q2}^n + I_{d2}^n \cdot \cos \phi_{d2}^n) + \\ + \frac{1}{2} \cdot S_d^n \cdot (I_{d2}^p \cdot \sin \phi_{d2}^p + I_{q2}^p \cdot \cos \phi_{q2}^p) + \frac{1}{2} \cdot S_q^n \cdot (I_{q2}^p \cdot \sin \phi_{q2}^p - I_{d2}^p \cdot \cos \phi_{d2}^p). \quad (10.43)$$

В цьому випадку гармоніка четвертого порядку додається до напруги кола постійного струму. Кінцевою метою керування є подавити напругу гармонік парного порядку для створення постійної вихідної напруги постійного струму.

У сталому стані змінні на стороні постійного струму можуть бути замінені сумою постійного сигналу постійного струму і сигналу пульсації змінного струму:

$$u_{dc} = \bar{u}_{dc} + \Delta u_{dc}; \quad (10.44)$$

$$i_{dc} = \bar{i}_{dc} + \Delta i_{dc}. \quad (10.45)$$

Оскільки сигнал постійного струму з'являється як періодичний сигнал, складова постійного струму  $\bar{i}_{dc}$  може бути отримана з інтеграла від  $i_{dc}$  за один цикл, що аналогічно виразу 10.39 :

$$\bar{i}_{dc} = \frac{\omega}{2\pi} \cdot \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} i_{dc} \cdot dt = I_0; \quad (10.46)$$

$$\Delta i_{dc} = I_{r2\sin} \cdot \sin(2 \cdot \omega t) + I_{r2\cos} \cdot \cos(2 \cdot \omega t) + \\ + I_{r4\sin} \cdot \sin(4 \cdot \omega t) + I_{r4\cos} \cdot \cos(4 \cdot \omega t). \quad (10.47)$$

Оскільки навантаження резистивне,  $\bar{u}_{dc}$  можна записати як:

$$\bar{u}_{dc} = R_{dc} \cdot \bar{i}_{dc} = R_{dc} \cdot I_0. \quad (10.48)$$

Підставляючи вирази 10.46 і 10.48 в 10.15 і скорочуючи постійні складові, можна записати як:

$$\Delta \dot{u}_{dc} = -\frac{1}{C \cdot R_{dc}} \cdot \Delta u_{dc} + \frac{1}{C} \cdot \Delta i_{dc}. \quad (10.49)$$

На основі виразу 10.49 можна вирішити диференціальне рівняння 10.50:

$$\begin{aligned} \Delta u_{dc} = & K \cdot e^{-\frac{1}{C \cdot R_{dc}} t} + \frac{R_{dc} \cdot \sqrt{I_{r2\sin}^2 + I_{r2\cos}^2}}{\sqrt{1 + 4 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot R_{dc}^2}} \cdot \sin(2 \cdot \omega t + \phi_{u2}) + \\ & + \frac{R_{dc} \cdot \sqrt{I_{r4\sin}^2 + I_{r4\cos}^2}}{\sqrt{1 + 16 \cdot \omega^2 \cdot C^2 \cdot R_{dc}^2}} \cdot \sin(4 \cdot \omega t + \phi_{u4}), \end{aligned} \quad (10.50)$$

де  $K$  – постійна стала.

Рівняння 10.50 може бути виражено у вигляді двох частин: перша частина є зменшувальною. Вона буде експоненціально затухати до нуля в стаціонарному стані. Коли значення конденсатора  $C$  малі, що означає, що система з невеликим конденсатором, реакція напруги кола постійного струму буде швидкою. І тільки друга частина існує в стаціонарному стані і проявляється як складові пульсації другого і четвертого порядку в напрузі кола постійного струму в умовах несиметричного живлення. Може бути додатково спрощено, як в сталому режимі:

$$\Delta u_{dc} = \frac{\sqrt{I_{r2\sin}^2 + I_{r2\cos}^2}}{2 \cdot \omega \cdot C} \cdot \sin(2 \cdot \omega t + \phi_{u2}) + \frac{\sqrt{I_{r4\sin}^2 + I_{r4\cos}^2}}{4 \cdot \omega \cdot C} \cdot \sin(4 \cdot \omega t + \phi_{u4}). \quad (10.51)$$

Для того, щоб мінімізувати гармоніки другого та четвертого порядку в напрузі кола постійного струму на малому конденсаторі, для отримання належних сигналів керування для приведених значень  $I_{r2\sin}$ ,  $I_{r2\cos}$ ,  $I_{r4\sin}$  і  $I_{r4\cos}$  стало критичним. З виразу 10.51 видно, що лише тоді, коли умови  $I_{r2\sin} = 0$ ,  $I_{r2\cos} = 0$ ,  $I_{r4\sin} = 0$  і  $I_{r4\cos} = 0$  задовольняються одночасно, пульсації постійної напруги  $\Delta u_{dc}$  можна зняти, так щоб можна було підтримувати постійну вихідну напругу постійного струму.

З вищезазначеного аналізу, мета фізичного керування напругою без пульсацій постійного струму представлена з точки зору математичного виразу, який можна зрозуміти більш детально, а отже, покращує розуміння появи гармонік на лінії змінного струму та напруги для трифазного перетворювача ШІМ при незбалансованих робочих умовах [11].

## 10.4 Дослідження похибки математичних моделей літій-іонних накопичувачів

Літій-іонні батареї є одним з найбільш популярних джерел енергії для широкого класу автономних пристроїв – від мобільних телефонів до електромобілів. При цьому математичні моделі літій-іонних батарей є одними з ключових питань при моделюванні автономних пристроїв, так як вони визначають ємність та час роботи батарей, стабільність напруги під час розряду, а також швидкість заряду батареї. Як накопичувач енергії, батарея є одним з базових елементів від якого залежить розвиток електромобілів. Літій-іонна батарея відома завдяки своїм перевагам, таким як висока щільність енергії, висока швидкість заряду та розряду, безпека і т. п. У зв'язку з розширенням досліджень в області імітаційного моделювання процесів в літій-іонних батареях електромобілів важливим є забезпечення високої точності моделювання процесів заряду та розряду.

Швидкий заряд залежить від передачі енергії в акумулятор при дуже високих рівнях потужності. Це не тільки хімічний склад батареї, який визначає рівень потужності, при якому елемент може приймати заряд, але також і метод, який використовується для заряду батареї [12-13]. Найбільш популярною процедурою заряду акумулятора є метод постійної напруги з постійним струмом (CC-CV) (див. рис. 10.6).

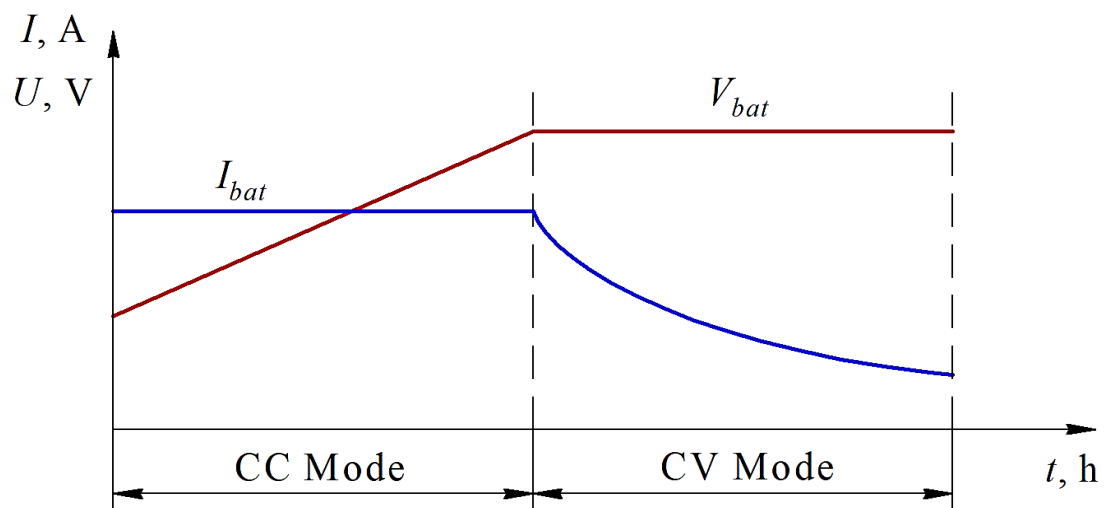


Рисунок 10.6 – Зарядні характеристики батареї (Джерело: [15])

Існують різні математичні моделі та еквівалентні схеми, що описують процеси в літій-іонних батареях, такі як активно-резистивна модель батареї, динамічна резистивної-конденсаторна, модель Тевеніна першого і другого порядку. Дані моделі дають різну точність опису зарядно-розрядних характеристик [14].

На рис. 10.7 наведено модель літій-іонної батареї, що враховує активний опір батареї (активно-резистивна модель). Існують різні варіанти реалізації моделі, при яких значення внутрішнього опору батареї є або константою  $R_{int} = \text{const}$ , або залежить від відсотка заряду батареї  $R_{int} = f(\text{SoC})$ , де  $\text{SoC}$  – відсоток заряду батареї (state of charge). Аналогічно, в різних моделях внутрішня ЕРС батареї може бути константою  $U_{oc} = \text{const}$ , або ж залежати від відсотка заряду батареї  $U_{oc} = f(\text{SoC})$ .

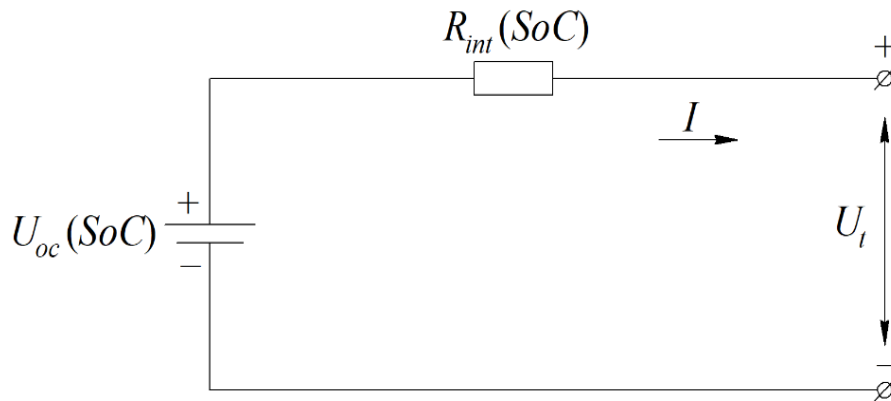


Рисунок 10.7 – Активно-резистивна модель батареї з урахуванням втрати потужності (Джерело: [15])

У разі, коли напруга  $U_{oc}$  і опір залежать від відсотка заряду, вихідну напругу на клеммах батареї можна виразити як:

$$\begin{cases} U_t = U_{oc}(SoC) - R_{int}(SoC) \cdot I; \\ U_{oc}(SoC) = U_0 - k \cdot SoC; \\ R_{int}(SoC) = R_{int} - k_r \cdot SoC, \end{cases} \quad (10.52)$$

де  $I$  – струм батареї;

$U_0$  – напруга холостого ходу, коли батарея повністю заряджена;

$k, k_r$  – емпірично отримані коефіцієнти.



Серед недоліків, модель не знижує пропускну здатність при збільшенні навантаження, тому вона не підходить для динамічних систем або перехідних станів.

На основі динамічних характеристик і принципів роботи батареї було розроблено резистивно-конденсаторну модель еквівалентної схеми з використанням резисторів, конденсаторів в якості джерел напруги рис. 10.8. [14].

Ця модель включає в себе конденсатор  $C_a$ , який представляє накопичену ємність, послідовний опір  $R_a$ , що представляє поляризаційний ефект, конденсатор  $C_p$  і залежний від струму опір  $R_p$ , що імітує ефекти поляризації і розсіювання потужності на внутрішній опір  $R_{int}$ . Значення  $C_p$  дуже мале, в той час як значення  $C_a$  зазвичай приймає дуже великі значення.

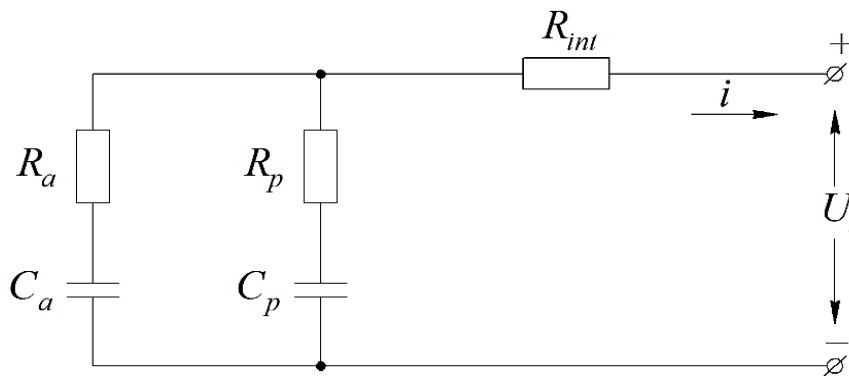


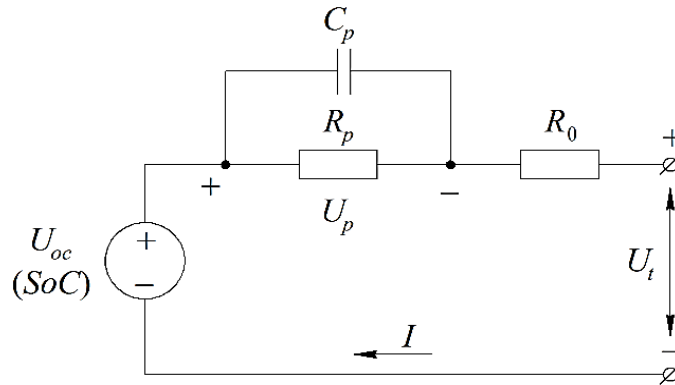
Рисунок 10.8 – Резистивно-конденсаторна модель батареї  
(Джерело: побудоване автором)

Значення  $SoC$  представлено в зміні напруги через конденсатори  $C_a$  і  $C_p$ . Рівняння 10.53 описують роботу батареї:

$$\begin{cases} U_t = U_{Cp} - I_{Cp} \cdot R_p - I \cdot R_{int}; \\ U_t = U_{Ca} - I_{Ca} \cdot R_a - I \cdot R_{int}; \\ I = I_{Cp} + I_{Ca}; \\ E_C = C \cdot U^2 / 2; \\ I_C = C \cdot dU / dt. \end{cases} \quad (10.53)$$

Недоліком даної моделі є те, що опис процесу розряду має досить великі похибки в зоні повного розряду. Зона  $SoC$  20 - 80 % описується цією моделлю досить точно. Модель літій-іонних батарей Тевеніна першого порядку описує зарядні-розрядні характеристики, як активно-резистивну модель з додатковим  $RC$ -колом, що з'єднані паралельно. Параметри  $RC$  залежать від величин  $SoC$ , струму і температури.

Модель літій-іонних батарей Тевеніна першого порядку описує зарядні-розрядні характеристики, як активно-резистивну модель з додатковим  $RC$ -колом, що з'єднані паралельно. Параметри  $RC$  залежать від величин  $SoC$ , струму і температури. Модель Тевеніна першого порядку наведено на рис. 10.9 [14].



**Рисунок 10.9** – Еквівалентна схема моделі Тевеніна першого порядку  
(Джерело: [15])

Процеси заряду-розряду батареї визначаються за виразом:

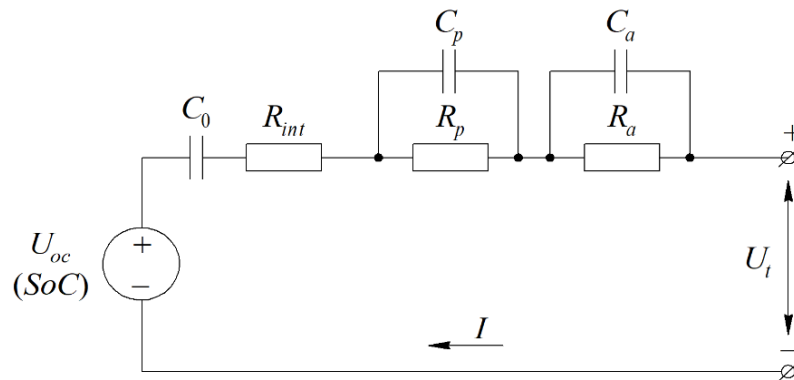
$$\begin{cases} U_t = U_{oc} - U_p - I \cdot R_0; \\ U_p = \frac{I}{C_p} - \frac{U_p}{C_p \cdot R_p}; \\ U_{oc} = K_0 + K_1 \cdot \ln SoC + K_2 \cdot \ln(1 - SoC), \end{cases} \quad (10.54)$$

де:  $R_0$  – омичний опір;

$R_p$  – поляризаційний опір;

$C_p$  – ємність поляризації, що використовується для опису перехідного процесу під час заряду-розряду батареї.

Резистор  $R_0$  забезпечує внутрішній опір елемента, на який впливають  $SoC$ , температура і ступінь старіння. Для більш точного опису процесів заряду-розряду використовується модель Тевеніна другого порядку рис. 10.10.



**Рисунок 10.10** – Еквівалентна схема моделі Тевеніна другого порядку  
(Джерело: побудоване автором)

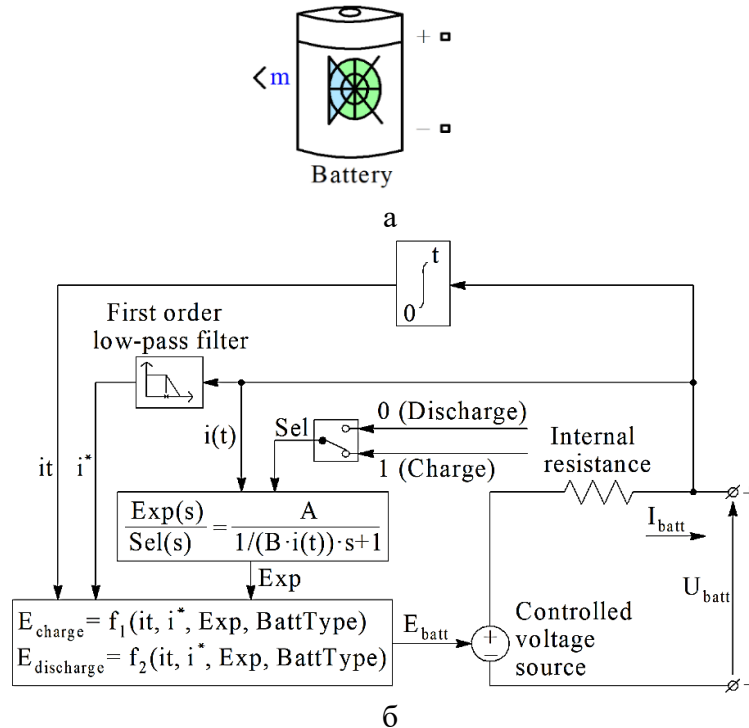
Модель Тевеніна другого порядку має один додатковий компонент  $RC$  в порівнянні з моделлю першого порядку. З додатковим компонентом  $RC$  модель другого порядку може досягати більшої точності з точки зору опису перехідного поведінки осередки, але в той же час обчислювальна потужність збільшується. Перше  $RC$ -коло має низьку сталу часу для опису короточасних перехідних ефектів. Ці перехідні ефекти пов'язані з електрохімічними ефектами і ефектами концентраційної поляризації, включаючи ефект переносу заряду, дифузію і інші фактори.

Рівняння, які описують роботу моделі Тевеніна другого порядку, мають вигляд:

$$\begin{cases} U_t = U_{oc} - I \cdot R_{int} - U_{C_1} - U_{C_2}; \\ U_{C_1} = -\frac{1}{C_1 \cdot R_1} \cdot U_{C_1} + \frac{1}{C_1} \cdot I; \\ U_{C_2} = -\frac{1}{C_2 \cdot R_2} \cdot U_{C_2} + \frac{1}{C_2} \cdot I; \\ U_{oc} = K_0 + K_1 \cdot \ln SoC + K_2 \cdot \ln(1 - SoC). \end{cases} \quad (10.55)$$

Таким чином, можна зробити висновок, що модель Тевеніна другого порядку є більш точною і в той же час досить простою. Відповідно до вимоги щодо точності моделі кількість компонентів  $RC$ , доданих в модель, може бути збільшено навіть до нескінченності. Однак, як зазначено вище, складність моделі зростає зі збільшенням кількості компонентів  $RC$ . Модель завжди вибирається на основі компромісу між точністю і обчислювальною потужністю. В Matlab / Simulink/ SimPower Systems існує бібліотечний компонент літій-іонної батареї «Battery» рис.10.11 [15], а – структурну схему блоку «Battery» наведено на рис. 10.11, б – підсистема є еквівалентною схемою простої лінійної моделі батареї, в якій внутрішній опір не є змінним.

На рис. 10.11 введено такі позначення:  $E_{Batt}$  – нелінійна напруга, В;  $Exp(s)$  – динамічна експонентна зона, В;  $Sel(s)$  – режим роботи батареї ( $Sel(s) = 0$  під час розряду,  $Sel(s) = 1$  під час заряду).



а – зовнішній вигляд; б – внутрішня структура підсистеми

Рисунок 10.11 – Блок «Battery» в Matlab / Simulink (Джерело: [15])

Зарядна та розрядна характеристики літій-іонної батареї, що наведено в Matlab, описується виразами:

$$f_1(i_t, i^*, i) = E_0 - \frac{K \cdot Q}{(Q - i_t) \cdot i^*} - \frac{K \cdot Q}{(Q - i_t) \cdot i_t} + A \cdot e^{(-B \cdot i_t)}; \quad (10.56)$$

$$f_2(i_t, i^*, i) = E_0 - \frac{K \cdot Q}{(i_t + 0,1 \cdot Q) \cdot i^*} - \frac{K \cdot Q}{(Q - i_t) \cdot i_t} + A \cdot e^{(-B \cdot i_t)}, \quad (10.57)$$

де:  $i_t$  – величина витраченого заряду, А·год;

$i^*$  – низькочастотна складова струму, А;

$i$  – струм батареї, А;

$E_0$  – постійна напруга, В;

$K$  – поляризаційна константа, В/А·год, вона ж і опір поляризації, Ом;

$Q$  – максимальний заряд батареї, А·год;

$A$  – експонентна напруга, В;

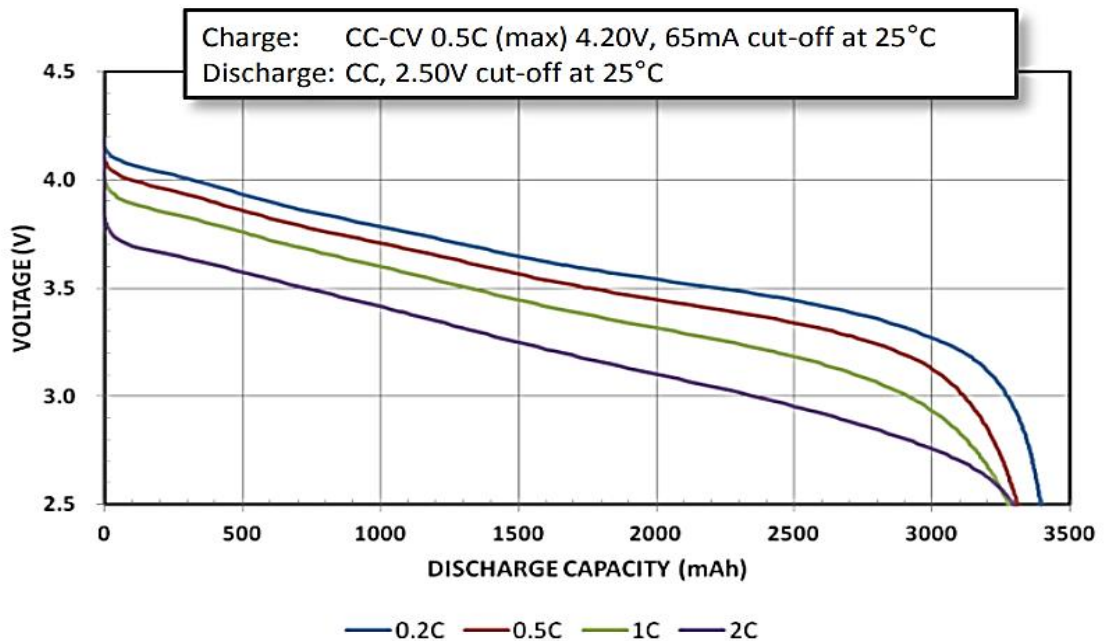
$B$  – ємність в експонентній зоні, А·год<sup>-1</sup>.

В програмному пакеті Matlab/Simulink виконано моделювання зарядно-розрядних характеристик літій-іонної батареї типу NCR-18650b, виробництва компанії Panasonic [15-16]. Перевагою даної батареї є велика ємність та більша кількість циклів заряду-розряду в порівнянні з іншими батареями типорозміру 18650 [39-40]. При моделюванні було використано параметри, зазначені в документації для батареї типу NCR-18650b [15-16] (див. табл. 10.1).

**Таблиця 10.1** – Технічні характеристики батареї типу NCR-18650b

(Джерело: [16])

Характеристика		Значення
Номінальна ємність, мА·год		3200
Номінальна напруга, В		3,6
Час повного заряду, год		4
Вага, г		48,5
Температура, °С	заряду	0...+45
	розряду	-20...+60
Щільність енергії, Вт/кг		243



**Рисунок 10.12** – Розрядні характеристики батареї NCR-18650b згідно її документації (Джерело: [16])

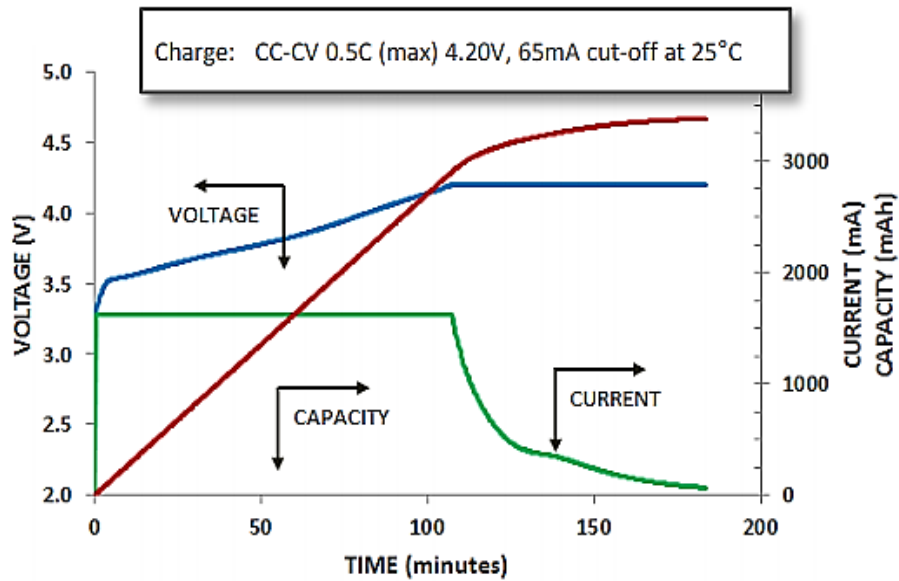


Рисунок 10.13 – Зарядно-розрядні характеристики батареї NCR-18650b згідно її документації (Джерело: [16])

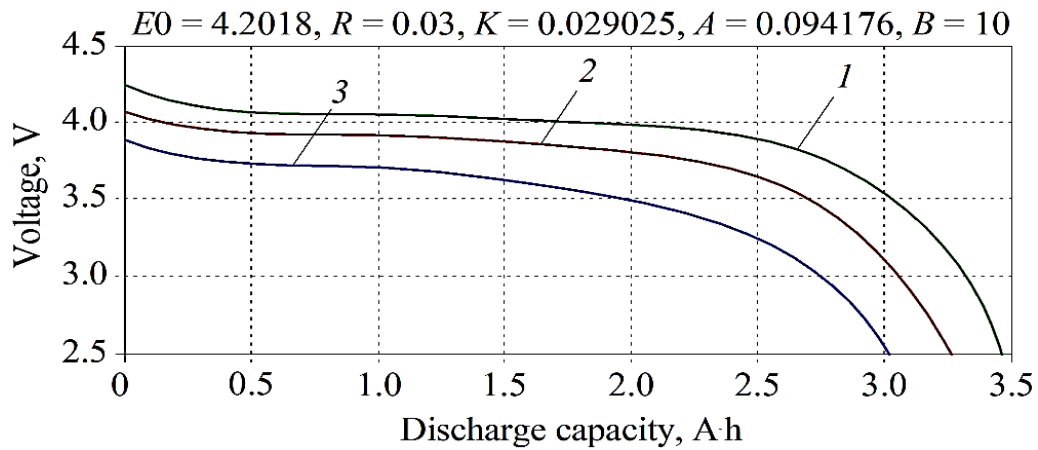
Основні параметри налаштування параметрів літій-іонної батареї в Matlab/Simulink/SymPowerSystems наведено на рис. 10.14 [15-16].

Parameters	Discharge
<input type="checkbox"/> Determined from the nominal parameters of the battery	
Maximum capacity (Ah)	3.350
Cut-off Voltage (V)	2.5
Fully charged voltage (V)	4.2
Nominal discharge current (A)	3.2
Internal resistance (Ohms)	0.03
Capacity (Ah) at nominal voltage	2.5
Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[4 0.3]
Display characteristics	
Discharge current [i1, i2, i3,...] (A)	[0.650 3.25 6.5]
Units	Ampere-hour
Plot	

Рисунок 10.14 – Налаштування блока Battery в програмі Matlab / Simulink (Джерело: побудоване автором)



Результати моделювання, а саме характеристика розряду батареї при різних струмах навантаження, що отримано в програмі Matlab / Simulink, наведено на рис. 10.15.



1 – 0,65 А (0,2С); 2 – 3,2 А (1С); 3 – 6,5 А (2С)

**Рисунок 10.15** – Результати моделювання розрядних характеристик батареї NCR-18650b - залежності напруги від ємності при струмах розряду (Джерело: побудоване автором)

Похибки розрядних характеристик літій-іонної батареї NCR-18650b розглянутих математичних моделей та вбудованої Matlab-моделі відносно даних, представлених в технічних даних, наведено в табл. 10.2.

**Таблиця 10.2** – Похибки розрядних характеристик існуючих математичних моделей літій-іонної батареї NCR-18650b (Джерело: складено автором)

Тестування ємності	Відносна приведена похибка								
	При струмі розряду 0,65 А			При струмі розряду 3,2 А			При струмі розряду 6,5 А		
Діапазон глибини розряду, %	0 - 5	5 - 85	85 -100	0 - 5	5 - 85	85 -100	0 - 5	5 - 85	85 -100
Відхилення даних Matlab-моделі «Battery» відносно Datasheet	4,5	13,3	11,1	9,4	18,2	5,9	17	23	30
Активно-резистивна модель	2,2	4,3	16,1	3,1	5,8	18,0	4,2	6,4	18,6
Резистивно-конденсаторна модель	7,7	1,7	63,6	7,1	2,1	58,1	6,8	3,2	54,2
Модель Тевеніна	2,1	0,8	21,4	2,0	1,1	20,1	2,0	4,3	19,7

В діапазоні, коли батарея майже повністю розряджена 85 - 100 % існуючі математичні моделі досить неточно описують значення напруги на батареї. Висока похибка моделювання розрядних характеристик у вбудованій Matlab-моделі блока «Battery» обумовлена, в першу чергу, неідеальною математичною моделлю, що описує характеристику розрядку, тому для підвищення точності моделювання процесів в літій-іонних батареях запропоновано наступними апроксимуючими виразами, що описують залежність напруги батареї від струму заряду та ступені заряду.

### **10.5 Синтез математичної моделі зарядно-розрядних характеристик літій-іонної батареї NCR-18650b**

Через те, що моделювання літій-іонної батареї NCR-18650b з використанням існуючих схем заміщення та базової моделі Matlab дало високу похибку відносно даних в документації батареї, для підвищення точності комп'ютерного моделювання зарядно-розрядних характеристик, виконано синтез виразів, що описують характеристики заряду та розряду батареї [15-16].

Шляхом поліноміальної апроксимації зарядно-розрядних характеристик, що представлено в документації, отримано тривимірні залежності напруги на батареї від струму батареї та величини поточного заряду батареї  $V_{роз}(SoC, I_c)$  і заряду  $V_{зар}(SoC, I_c)$ .

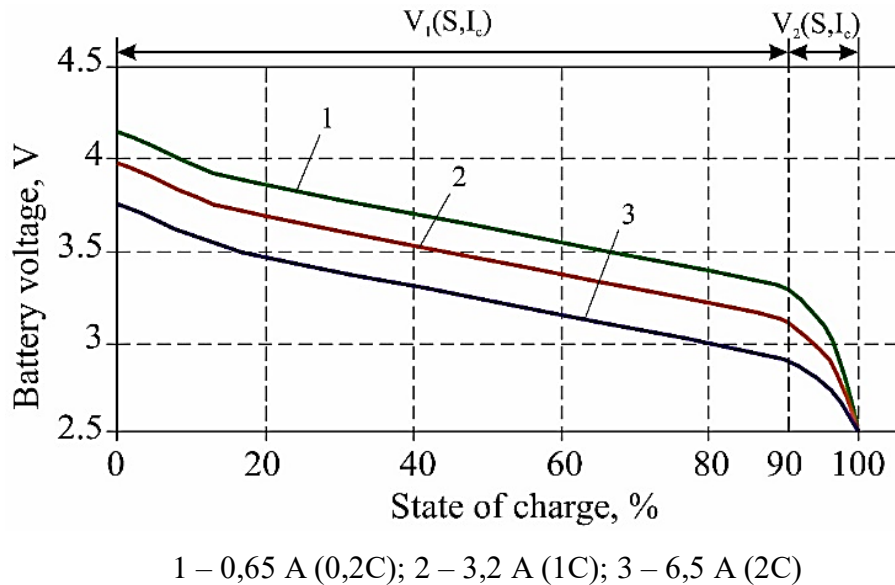
При цьому для отримання більшої точності характеристику напруги батареї отримано для двох інтервалів розряду двома рівняннями. У першому інтервалі  $SoC$  від 0 до 90 % описується функцією  $V_{роз1}(SoC, I_c)$ , а в інтервалі  $SoC$  від 90 % до 100 % функцією  $V_{роз2}(SoC, I_c)$ .

$$V_1(SoC, I_c) = -1,33 \cdot 10^{-6} \cdot S^3 + 2,37 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 - 2 \cdot 10^{-2} \cdot S - 6,68 \cdot 10^{-3} I_c + 4,19; \quad (10.58)$$

$$V_2(SoC, I_c) = \left[ \begin{array}{l} (-4,762 \cdot 10^{-4} \cdot S^3 + 1,321 \cdot 10^{-1} \cdot S^2 - 12,237 \cdot S + 381 - 2,5) \times \\ \times (-0,21 \cdot I_c + 2,362) \end{array} \right] + 2,5 \cdot$$

де  $S$  – поточний стан заряду ( $SoC$ ) батареї. (10.59)

Графічно отримані залежності наведено на рис. 10.16.



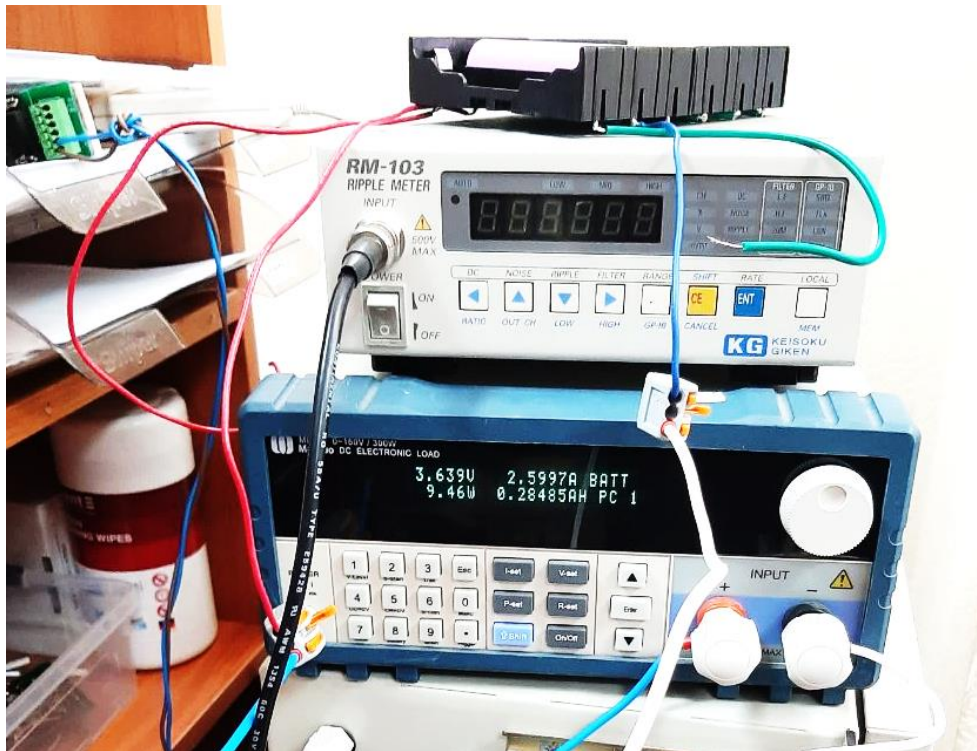
**Рисунок 10.16** – Залежності напруги від ємності з запропонованими виразами  
(Джерело: складено автором)

Як видно з рисунків, отримані вирази дозволяють більш точно описати характеристики розряду батареї, що забезпечує більшу точність моделювання ніж існуючі.

### 10.6 Фізичний дослід з визначення зарядно-розрядної характеристики батареї NCR-18650b

Для підтвердження отриманих математичних виразів, що описують характеристики заряду/розряду, та порівняння з даними наведених в Datasheet, було проведено випробування нової батареї типу NCR-18650b.

Перед розрядом батарея була повністю заряджена методом CC–CV до напруги 4,2 В. Випробувальний стенд, що наведено на рис. 10.17, складається з електронного навантаження, підключеного до USB-порту комп'ютера через перетворювач інтерфейсів USB / RS-485 – AC-4 виробництва компанії ТОВ «ВО ОБЕН».

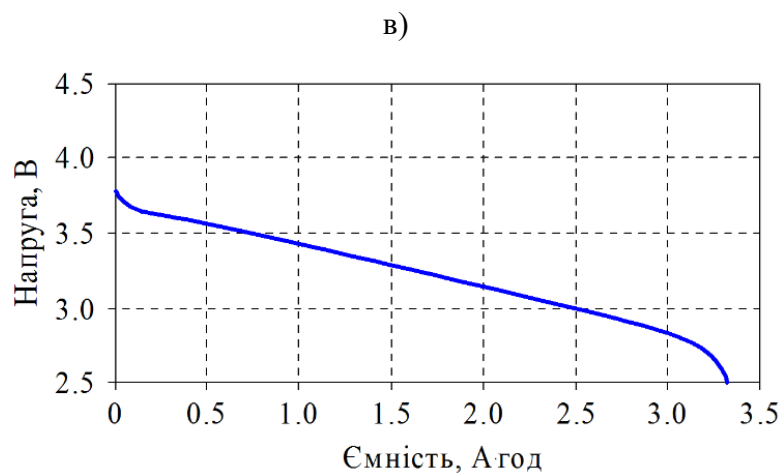
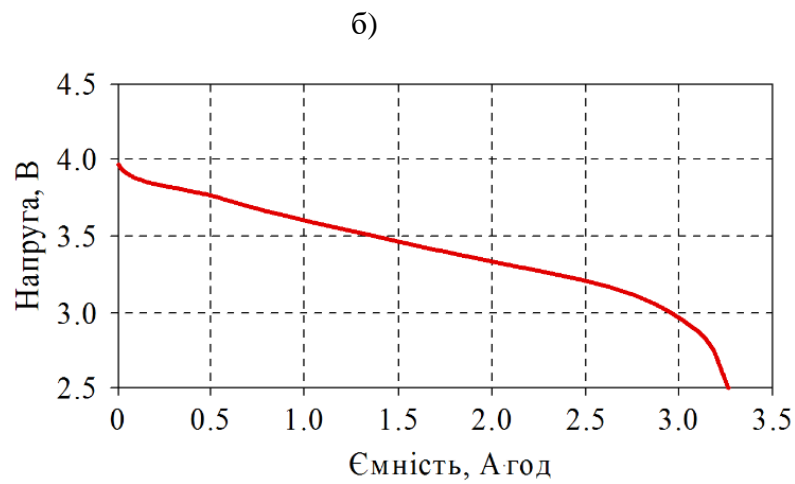
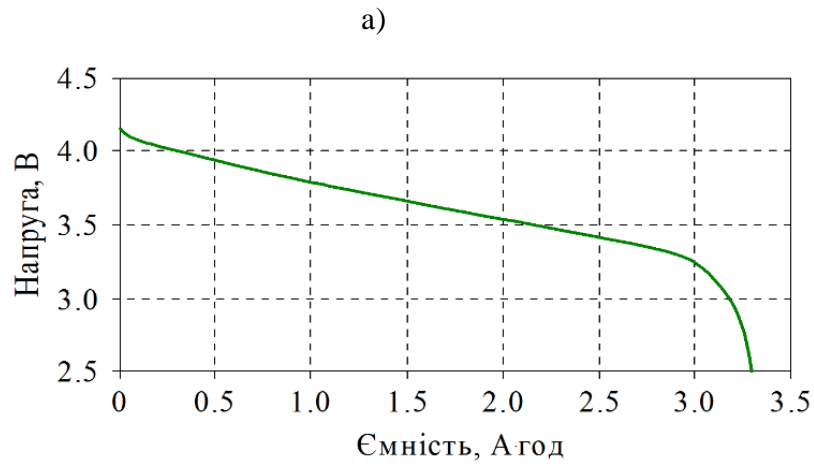


**Рисунок 10.17** – Випробувальний стенд, на якому отримані зарядно-розрядні характеристики літій-іонної батареї (Джерело: фото автора)

За допомогою стенду проводилося три випробування для розряду батареї, при яких електронне навантаження розряджало батарею струмом 0,65 А (0,2С), 3,2 А (1С) і 6,5 А (2С). Отримані в ході експерименту розрядні характеристики батареї при різних значеннях струму розряду наведено на рис. 10.18.

Проведені експерименти показали, що характеристики, що наведено у технічній документації та характеристики, отримані в результаті проведених випробувань, схожі між собою. Результати аналізу температури батареї під час розряду струмом 6,5 А тепловізором типу Dali Tei-P наведено на рис. 10.19.

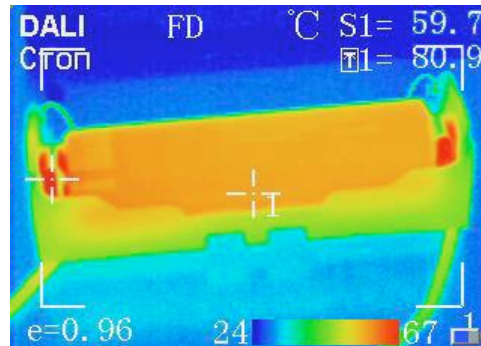
Як видно з рис. 10.19 температура батареї досягає 80,9 °С що впливає на відхилення реальних параметрів відносно заявлених в документації.



а) – 0,65 А (0,2С); б) – 3,2 А (1С); в) – 6,5 А (2С)

Рисунок 10.18 – Залежності напруги від ємності при струмах розряду

(Джерело: побудоване автором)



**Рисунок 10.19** – Температурна картина батареї під час розряду струмом 6,5 А  
(Джерело: зроблено автором)

У табл. 10.3 наведено похибки розрядних характеристик фізичного експерименту та імітаційної моделі літій-іонної батареї типу NCR-18650b відносно даних, представлених в таблиці даних.

**Таблиця 10.3** – Похибки розрядних характеристик фізичного експерименту та імітаційної моделі літій-іонної батареї NCR-18650b (Джерело: складено автором)

Тестування ємності	Відносна приведена похибка								
	При струмі розряду 0,65 А			При струмі розряду 3,2 А			При струмі розряду 6,5 А		
Діапазон глибини розряду, %	0 - 5	5 - 90	90 - 100	0 - 5	5 - 90	90 - 100	0 - 5	5 - 90	90 - 100
Відхилення фізичного експерименту від таблиці даних, %	1,3	1,3	< 1	4,5	4,7	1,5	9	9	7,6
Відхилення даних імітаційної моделі від таблиці даних, %	4,5	13,3	11,1	9,4	18,2	5,9	17	23	< 100
Відхилення запропонованої моделі Matlab від таблиці даних, %	2	3	6	2	3	6	2	3	6

При низькому струмі розряду  $0,2C = 0,65$  А відносна похибка експерименту та характеристика, що наведено в документації, не перевищує 2 %.

Розбіжність в характеристиках розряду реального зразка при струмі  $2C = 6,5$  А відносно параметрів з технічної документації на батарею значно більша (до 9 %). Це можливо з двох причин:

- технологічний розкид виробництва батарей;
- температура батареї при розряді.



У технічній документації на батарею температура в режимі розряду повинна бути в діапазоні від  $-20$  до  $+60$  °С. В реальних умовах високий струм розряду викликає нагрів батареї до рівня  $70 - 80$  °С рис. 10.19, що додатково може викликати спотворення характеристик. Що стосується імітаційного моделювання, то похибка характеристик, отриманих в Matlab-моделі при найбільших струмах розряду досягає 23 %. Однак слід зазначити, що дана висока похибка характерна тільки для моделювання процесу розряду високим струмом. При моделюванні меншого струму розряду відсоток похибки менший.

## **10.7 Висновки**

Підсумовуючи і аналізуючи інформацію з офіційних джерел можна зробити висновок, що тенденція розвитку сучасного електротранспорту буде активно зростати. Також необхідно мати енергоефективні швидкісні зарядні станції для електромобілів. Данним прикладом може бути запропонована сучасна швидкісна енергоефективна зарядна станція для електромобілів з використанням дворівневого чотириквadrантного активного випрямляча.

В ході роботи наведені результати дослідження:

- представлено схему перетворювача для системи заряду електромобілів;
- представлено математичну модель трифазного ШІМ-перетворювача джерела напруги змінного струму в постійний для симетричних та несиметричних робочих умов;
- представлено еквівалентні схеми літій-іонних акумуляторів та математичний опис процесів заряду-розряду;
- проведено аналіз математичних моделей еквівалентних схем різних типів літій-іонних батарей;
- проведено фізичне моделювання батареї NCR-18650b для підтвердження її параметрів, яка буде використовуватися в якості навантаження при моделюванні перетворювача для системи заряду електромобіля.

## **Список використаних джерел**

- 1 Гнатов, А. В. та ін. (2021). Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем. Автомобіль і електроніка. *Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання*, № 20, 17–26. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2021.20.0.02>.
- 2 Нерубацький, В. П. та ін. (2019). Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем заряджання електромобілів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, № 6, 11–19.

- 3 Yang, H., Saeedifard, M. (2017). A capacitor voltage balancing strategy with minimized AC circulating current for the DC-DC modular multilevel converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (64) 2, 956–965.
- 4 Plakhtii, O., et al. (2020). Improving energy indicators of the charging station for electric vehicles based on a three-level active rectifier / Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Mashura, A., Hordiienko, D., Khoruzhevskiy, H. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, 8 (105), 46–55.
- 5 Багач, Р. (2023). Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 62–71. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2023.24.0.2>
- 6 Umoren, I. A., et al. (2020). Resource efficient vehicle-to-grid (V2G) communication systems for electric vehicle enabled microgrids / Umoren, I. A., Shakir, M. Z., & Tabassum, H. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(7), 4171–4180.
- 7 Venkatramanan, D., et al. (2019). Power Conversion Technologies for High-Performance AC Micro-grid / Venkatramanan, D., Bharadwaj, P., Adapa, A. K., John, V. *INAE Lett*, Vol. 4 (1), 27–35.
- 8 Крилов, Д., Холод, О. (2022). Параметрична система керування трифазним активним випрямлячем з фіксованою частотою модуляції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*, (4 (14)), 11–17.
- 9 Plakhtii, O., et al. (2020) Improving the harmonic composition of output voltage in multilevel inverters under an optimum mode of amplitude modulation / Plakhtii, O., Nerubatskyi V., Sushko D., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, 8 (104), (17–24). DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200021.
- 10 Bodo, N., et al. (2017). Efficiency Evaluation of Fully Integrated On-Board EV Battery Chargers With Nine-Phase Machines / Bodo N. Levi E., Subotic I., Espina J., Empringham L., Johnson C. M. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 32, Issue 1. (257–266). DOI: 10.1109/tec.2016.2606657.
- 11 Нерубацький, В. П. та ін. (2019). Аналіз енергетичних процесів у семирівневому автономному інверторі напруги при різних алгоритмах модуляції / Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Карпенко, Н. П., Гордієнко, Д. А., Цибульник, В. Р. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, № 5. С. 8–18. DOI: 10.18664/ikszt.v24i5.181286.
- 12 Нерубацький, В. П. та ін. (2023). Підвищення точності моделювання перехідних процесів і розрахунку втрат потужності напівпровідникових перетворювачів у програмному середовищі NI Multisim / Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Гордієнко, Д. А., Філіп'єва, М. В., Багач, Р. В. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, (2), 22–35. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283312>.
- 13 Plakhtii, O., et al. (2022). Research of Operating Modes and Features of Integration of Renewable Energy Sources into the Electric Power System / Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Hordiienko, D. *IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 133–138. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969337.
- 14 Plakhtii, O., et al. (2019). Research of mathematical models of lithium-ion storages / Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Philipjeva, M., & Mashura, A. *Mathematical Modeling*, 3(4), 127–130.
- 15 Plakhtii, O., et al. (2020). The analysis of mathematical models of charge-discharge characteristics in lithium-ion batteries / Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Mashura, A., & Hordiienko, D. *IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 635–640.
- 16 Dong, B., et al. (2018). Adoption of thermal behavior as an indicator for enhancement of the EIS analysis for NCR 18650B Commercial Lithium-ion batteries system / Dong, B., Li, Y., Ahmed, K., Ozkan, C. S., & Ozkan, M. *MRS Advances*, 3(53), 3155–3162.

## **SYNTHESIS OF A MATHEMATICAL MODEL OF A CHARGING STATION FOR ELECTRIC VEHICLES**

**Ruslan Bahach\***

**Keywords:** Charging station, single-stage structure, two-stage structure, three-phase active rectifier, power factor, pulse width modulation.

**The main objective of** increasing energy indicators and parameters of electromagnetic compatibility of converters of charging stations of electric vehicles with the power supply network by using active rectifiers with power factor correction.

**Methodology.** A fast charging station with an active rectifier is being investigated. The proposed charging station does not contain an additional DC / DC converter energy conversion circuit, which results in a smaller number of energy conversion stages and better efficiency indicators. As an AC / DC converter, it is suggested to use an active rectifier.

**Findings.** Summarizing and analyzing information from official sources, we can conclude that the trend of the development of modern electric transport will actively grow. It is also necessary to have energy-efficient fast charging stations for electric vehicles. A modern high-speed, energy-efficient charging station for electric cars using a two-level four-quadrant active rectifier can be offered as an example. In work the diagram of the converter for the charging system of electric vehicles is presented. A mathematical model of a three-phase PWM converter of an alternating current to direct current voltage source for symmetric and asymmetric operating conditions is given. Equivalent circuits of lithium-ion batteries and a mathematical description of charge-discharge processes are presented. The analysis of various mathematical models and physical simulation of an NCR-18650b battery to confirm its parameters, which will be used as a load.

**Conclusions and Recommendations.** Considering the active growth of electric transport on the territory of Ukraine. It is necessary to implement modern high-speed charging stations that would be able to have a smaller number of energy conversion stages and better energy efficiency indicators.

---

\***Ruslan Bahach** – graduate student, assistant of the Department of Automotive Electronics, Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [bagach.ruslan@gmail.com](mailto:bagach.ruslan@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ



**Каріна Володимирівна Бєлоконь** – кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки за сумісництвом. Національний експерт з більш чистого виробництва в рамках проекту «Ресурсоефективне та більш чисте виробництво» за підтримки ЮНІДО. Член комісії з питань здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря та управління якістю атмосферного повітря в місті Запоріжжі. Автор понад 250 наукових публікацій. **Наукові інтереси:** технології очищення газових викидів промислових підприємств, оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря викидами промислових підприємств та автотранспорту, підвищення рівня екологічної безпеки промислових підприємств та автотранспорту.

**Karina Belokon** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Research at the Y. M. Potebnya Engineering Education and Research Institute of Zaporizhzhia National University, Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies, Ecology and Technological Safety concurrently. National expert on environmentally friendly production within the framework of the Resource Efficient and Cleaner Production project supported by the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). Member of the Commission on State Monitoring in the Field of Atmospheric Air Protection and Air Quality Management in the city of Zaporizhzhia. Author of more than 250 scientific publications. **Research interests:** technologies of gas emissions purification from industrial enterprises, risk assessment of public health caused by air pollution from industrial enterprises and motor vehicles, improvement of environmental safety of industrial enterprises and motor vehicles.



**Олексій Володимирович Бобров** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехніки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». понад 50 наукових публікацій, у тому числі 3 включено до міжнародних наукометричних баз даних – Scopus та Web of Science, 2 монографії, 3 навчальні посібники. Учасник міжнародних проектів в рамках Меморандуму Національного технічного університету Дніпровська політехніка та Бранденбурзького технічного університету Коттбус-Зенфтенберг (Німеччина) «On Sustainability and e-Learning in Higher Education» (2022-2023). **Наукові інтереси:** сталий розвиток енергетики, електроенергетика, техніка високої напруги, електротехнічні матеріали.

**Oleksii Bobrov** – PhD, Associate Professor, Department of Electrical Engineering at Dnipro University of Technology. The author of more than 50 scientific publications, including 3 (included in the International Scientometric Databases – Scopus and Web of Science), 2 monographs, 3 textbooks. Participant in low international projects under the Memorandum of Dnipro University of Technology and Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg (Germany) “On Sustainability and e-Learning in Higher Education” (2022-2023). **Research interests:** sustainable energy development, power supply of industrial enterprises, power engineering, high-voltage equipment, electrical materials.



**Олена Олександрівна Борисовська** – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Переможець Всеукраїнського конкурсу «Винахід-2008». Нагороджена відзнакою «Green heart leader» від Office of Sustainable Solutions, Professional Association of Environmentalists of the World (PAEW). Міжнародний інженерний педагог, учасник чисельних міжнародних проектів, у тому числі за програмою ЄС «Молодь в дії» за тематичним спрямуванням «Environmental Changes – Human Obligation» (Польща), за програмою ЄС Erasmus, «MOSAIC: Multiculturalism - the Outcome of Social Acceptance, Integration and Culture» (Італія) тощо. Автор понад 100 наукових праць. **Наукові інтереси:** утилізація твердих побутових та промислових відходів, рециклінг, нуль відходів, підвищення рівня екологічної безпеки промислових підприємств.

**Olena Borysovskaya** – PhD, Associate Professor, Head of Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection at Dnipro University of Technology. Winner of Ukrainian national contest “Discovery-2008”. Awarded the “Green heart leader” award from the Office of Sustainable Solutions, Professional Association of Environmentalists of the World (PAEW). International engineering educator, participant of numerous international projects, including the EU programme “Youth in Action” in “Environmental Changes – Human Obligation”, the EU Erasmus program, “MOSAIC: Multiculturalism - the Outcome of Social Acceptance, Integration and Culture”, etc. Author of more than 100 publications. **Research interests:** disposal of solid household and industrial waste, recycling, zero waste, improving the environmental safety of industrial enterprises.



**Руслан Володимирович Багач** – асистент кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Керівник команди відбіркового Національного спеціалізованого конкурсу професійної майстерності SERVICE MASTER JUNIOR 2023 UA. Учасник проекту Erasmus+ KA2 «Цифрова трансформація освітнього процесу вищих навчальних закладів в Україні та Молдові для сталої взаємодії з підприємствами» (01.12.2023–30.11.2026). Автор понад 30 наукових праць. **Наукові інтереси:** електромобілі та їх інфраструктура для сталого розвитку; енергозберігаючі та енергоефективні технології на транспорті; технології зарядних станцій для електромобілів.

**Ruslan Bahach** – assistant of the automotive electronics department, Kharkiv National Automobile and Road University. Team leader of the selection National specialized competition of professional skills SERVICE MASTER JUNIOR 2023 UA. Participant in Erasmus+ KA2 project “Digital transformation of the educational process of higher educational institutions in Ukraine and Moldova for sustainable interaction with enterprises” (12.01.2023–11.30.2026). Author of more than 30 scientific works. **Research interests:** electric vehicles and their infrastructure; energy-saving and energy-efficient technologies in transport; technologies of charging stations for electric vehicles.





**Тетяна Володимирівна Куваєва** – доцент кафедри маркетингу Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро, Україна); кандидат економічних наук. Начальник відділу маркетингу. Учасник проєктів у рамках Меморандуму Національного технічного університету Дніпровська політехніка та Бранденбурзького технічного університету Коттбус-Зенфтенберг (Німеччина) «Сталий розвиток та електронне навчання у вищій освіті» (2019-2021). Член асоціації маркетингу України. Має більше 60 публікацій. **Наукові інтереси:** маркетинг взаємодії і партнерських відносин, промислові ланцюги створення вартості, маркетинг сталого розвитку, маркетингові дослідження, соціальна відповідальність бізнесу.

**Tetiana Kuvaieva** – PhD in Economics. Associate Professor of Marketing Department at the Dnipro University of Technology (Dnipro, Ukraine), Head of the Marketing Office; Participant in projects within the Memorandum of Dnipro University of Technology and Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg (Germany) “On Sustainability and e-Learning in Higher Education” (2019-2021). Member of the Ukrainian Marketing Association. Has more than 60 publications. **Research interests:** partnership marketing, industrial value chains, sustainable development marketing, marketing research, social responsibility of business.



**Олена Вікторівна Матухно** – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Екологічний аудитор, експерт міжнародних проєктів ГЕФ-ЮНІДО, Програми «U-LEAD з Європою», учасник міжнародного проєкту SIGNE (HORIZON-CL5-2021-D2-01-02 – Cross-sectoral solutions for the climate transition). Стипендіат фонду Alexander von Humboldt (Georg Forster Research Fellowship Programme for Experienced Researchers). Нагороджена відзнакою «Green heart leader» від Office of Sustainable Solutions, Professional Association of Environmentalists of the World (PAEW). Експерт Національного агентства з акредитації України з акредитації органів з верифікації тверджень щодо парникових газів. Автор понад 100 наукових праць. **Наукові інтереси:** екологічна безпека промислових підприємств; екологічні аспекти сталого розвитку, кліматична політика, впровадження системи торгівлі викидами парникових газів в Україні.

**Olena Matukhno** – PhD, Associate Professor of Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection at Dnipro University of Technology; Environmental auditor, Senior Expert of the international GEF–UNIDO projects, consultant expert of the international project Program "U-LEAD with Europe", participant of the international project "SIGNE" (HORIZON-CL5-2021-D2-01-02 - Cross-sectoral solutions for the climate transition). Fellow of the Alexander von Humboldt Foundation (Georg Forster Research Fellowship Programme for Experienced Researchers). Awarded the "Green heart leader" award from the Office of Sustainable Solutions, Professional Association of Environmentalists of the World (PAEW). Expert on accreditation of bodies for greenhouse gas claims' verification of the National Accreditation Agency of Ukraine. Author of more than 100 scientific works. **Research interests:** environmental safety of industrial enterprises; implementation of the Best Available Technologies in Ukraine; environmental aspects of Sustainable Development; climate policy, implementation of the Emissions Trading System in Ukraine.





**Артем Володимирович Павличенко** – доктор технічних наук, професор; перший проректор НТУ «Дніпровська політехніка»; професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища. Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки за розробку та впровадження технологій забезпечення техногенної та екологічної безпеки вугледобувних регіонів при ліквідації гірничих підприємств України. Секретар підкомісії 183 «Технології захисту навколишнього середовища» Науково-методичної ради МОН України. Член редакційної колегії журналу «Науковий вісник Національного гірничого університету» (SciVerse Scopus, 2012). Автор понад 180 наукових праць. **Наукові інтереси:** екологічний менеджмент, екологічна оцінка проектного і стратегічного рівнів, оцінка техногенного ризику та нормативи екологічної безпеки, сталий розвиток промислових регіонів, вища освіта для сталого розвитку.

**Artem Pavlychenko** – Dr.-Tech., Professor; First Vice-Rector of the Dnipro University of Technology; Professor of Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection at Dnipro University of Technology. Laureate of the State Prize of Ukraine in the field of science and technology for the development and implementation of technology to ensure technogenic and environmental safety of coal mining regions during the liquidation of mining enterprises in Ukraine. Secretary of Subcommittee 183 “Environmental Protection Technologies” of the Scientific and Methodological Council of the Ministry of Education and Science of Ukraine (SciVerse Scopus, 2012). Author of more than 180 scientific works. **Research interests:** environmental management, project environmental assessment and strategic environmental assessment, environmental risks of technogenic impact, environmental safety standards, sustainable development in industrial regions, higher education for sustainable development.



**Людмила Львівна Палєхова** – кандидат економічних наук, професор кафедри маркетингу, НТУ «Дніпровська політехніка». Експерт з питань управління сталим розвитком у міжнародній мережі університетів NESEFF. Координатор більше 40 міжнародних проєктів, які виконувалися зокрема сумісно з Бранденбурзьким технічним університетом Коттбус-Зенфтенберг (Німеччина). Учасник проєкту ПРООН «Нарощування потенціалу стратегічної екологічної оцінки в Україні», як незалежний консультант. Опубліковано понад 160 наукових праць. **Наукові інтереси:** менеджмент і маркетинг сталого розвитку, інструменти планування сталого розвитку регіонів та міст, моделі відповідального виробництва і споживання, вища освіта для сталого розвитку.

**Ludmila Paliekhova** – PhD in Economics, Professor of Marketing Department at the Dnipro University of Technology (Dnipro, Ukraine). Expert on sustainable development management in the international network of NESEFF universities. Coordinator of more than 40 international projects, which are carried out in particular jointly with the Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Germany. Participant of the UNDP project “Strengthening the Potential of Strategic Environmental Assessment in Ukraine” as an independent consultant. Author of more than 160 scientific works. **Research interests:** management and marketing for sustainable development, planning of sustainable development of regions and cities, models of responsible production and consumption, higher education for sustainable development.



**Любов Вікторівна Тимошенко** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної економіки, підприємництва та публічного управління Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Учасник проектів у рамках Меморандуму Національного технічного університету Дніпровська політехніка та Бранденбурзького технічного університету Коттбус-Зенфтенберг (Німеччина) «Сталий розвиток та електронне навчання у вищій освіті» (2022-2023). Автор більше 20 наукових статей, співавтор 7 монографій. **Наукові інтереси:** сталий розвиток територій, соціальна відповідальність бізнес-структур, економічне обґрунтування екологізації виробничих процесів.

**Liubov Tymoshenko** – Associate Professor of the Applied Economics, Entrepreneurship and Public Administration Department, Dnipro University of Technology, (Dnipro, Ukraine), PhD. (Economic), Associate Professor. Participant in projects within the Memorandum of Dnipro University of Technology and Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg (Germany) “On Sustainability and e-Learning in Higher Education” (2022-2023). Author of more than 20 scientific articles, is a co-author of 7 monographs. **Research interests:** sustainable development of territories, social responsibility of business, and economic justification of production processes ecologization.



**Світлана Альбертівна Ус** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри системного аналізу та управління Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», експерт Національного агентства забезпечення якості вищої освіти. Брала участь у проєкті Erasmus+, QUARE: Quality Assurance System in Ukraine: Development on the Base of ENQA Standards And Guidelines. Учасник проектів у рамках Меморандуму Національного технічного університету Дніпровська політехніка та Бранденбурзького технічного університету Коттбус-Зенфтенберг (Німеччина) «Сталий розвиток та електронне навчання у вищій освіті» (2022-2023). Автор більше 70 наукових статей, двох монографій, 15 навчальних посібників. **Наукові інтереси:** прийняття рішень в умовах невизначеності, моделювання складних систем, оптимізація розподілу матеріальних потоків у транспортно-логістичних системах з неперервно-розподіленим ресурсом.

**Svitlana Us** – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of Systems Analysis and Control Department of the Dnipro University of Technology, an expert of the National Agency for Quality Assurance in Higher Education. Participant in Erasmus+ project QUARE: Quality Assurance System in the Ukraine: Development on the Base of ENQA Standards and Guidelines. Participant in projects within the Memorandum of Dnipro University of Technology and Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg (Germany) “On Sustainability and e-Learning in Higher Education” (2022-2023). Author of more than 70 research articles, 2 monographs, and 15 textbooks. **Research interests:** decision-making under conditions of uncertainty, modeling of complex systems, and optimization of the distribution of material flows in transport-logistic systems with continuously distributed resource.



**Дмитро Володимирович ЦиПЛЕНКОВ** – кандидат економічних наук, завідувач кафедри електротехніки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Внутрішній аудитор інтегрованих систем менеджменту відповідно до вимог стандартів ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 та положень ISO 19011:2018; експерт VERNADSKY CHALLENGE; відповідальний секретар науково-технічного збірника «Електротехнічні та інформаційні системи». Учасник низки міжнародних проектів в рамках Меморандуму Національного технічного університету Дніпровська політехніка та Бранденбурзького технічного університету Коттбус-Зенфтенберг (Німеччина) «On Sustainability and e-Learning in Higher Education» (2022-2023). Автор 1 підручника, 7 навчальних посібників, 4 монографій та понад 60 наукових праць. **Наукові інтереси:** сталий розвиток енергетики, методи контролю ефективності використання електроенергії, відновлювана енергетика, електричні машини.

**Dmytro Tsyplenkov** – PhD, Associate Professor, Department of Electrical Engineering at Dnipro University of Technology. Internal auditor of integrated management systems in accordance with the requirements of ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 and ISO 19011:2018 regulations, Vernadsky Challenge Expert, responsible secretary of the scientific and technical collection “Electrotechnical and Information Systems”. Participant in low international projects under the Memorandum of Dnipro University of Technology and Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg (Germany) “On Sustainability and e-Learning in Higher Education” (2022-2023). Author of 1 textbook, 7 training manuals, 4 monographs and more than 60 scientific works. **Research interests:** sustainable energy development, methods of energy efficiency control, renewable energy, electric machines.



**Володимир Іванович ШАТОХА** – доктор технічних наук, професор, Інститут промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій. Опублікував понад 180 наукових робіт, 2 підручника; співавтор 8 монографій. Автор 7 патентів. Запрошений професор Токійського університету (2013), Почесний професор Університету науки і технологій Внутрішньої Монголії (Баотоу, Китай), член редакційної ради журналу Iron and Steel Institute of Japan International Journal (2008-2013 pp.). Координатор ряду міжнародних проектів, включаючи Tempus, Erasmus + та ін. Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (2010 р). **Наукові інтереси:** високотемпературні властивості залізрудних матеріалів, термодинамічне моделювання взаємодії метал-шлак, газифікація твердого палива, утилізація залізовмісних відходів, сталий розвиток чорної металургії.

**Volodymyr Shatokha** – Dr. Eng., Professor, Vice-Rector for research and education of the *National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro)*. Published over 180 research papers, 2 handbooks, co-authored 8 monographs. Author of 8 patents. Visiting professor with The Tokyo University (2013). Honorary professor with the Inner Mongolia University of Science and Technology (Baotou, China), member of the editorial board of the Iron and Steel Institute of Japan International Journal (2008-2013). Coordinated several international projects including Tempus, Erasmus+ and other. Laureate of the State prize of Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology (2010). **Research interests:** high temperature properties of iron ore materials, thermodynamic modeling of metal-slag interaction, solid fuel gasification, recovery of ferrous wastes, sustainable development of iron and steel sector.

Наукове видання

СТАЛЕ СПОЖИВАННЯ ТА ВИРОБНИЦТВО  
У ГЛОБАЛЬНИХ ЛАНЦЮГАХ  
СТВОРЕННЯ ВАРТОСТІ

Монографія

За заг. ред. А. В. Павличенка та Л. Л. Палехової

Українською мовою

Затверджено Вченою Радою  
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»  
як наукове видання  
Протокол № 13 від 26 грудня 2023 року

Оригінал-макет підготовлено НТУ «Дніпровська політехніка»  
Дизайн обкладинки та макетування – Ю.М. Макуха





У цій монографії досліджуються сучасні виклики управління сталим розвитком у глобальних ланцюгах доданої вартості з урахуванням завдань євроінтеграції, що постають перед українською промисловістю. Автори висвітлюють тенденції циркулярної економіки як способу управління сталим розвитком металургійної промисловості та обговорюють перспективи сталої трансформації енергетичного сектору як невід’ємної складової повоєнної відбудови України. Представлені результати дослідження можуть бути цікаві науковцям, викладачам, державним службовцям, а також керівникам підприємств.

*Публікація підготовлена Національним технічним університетом «Дніпровська політехніка» в рамках міжнародного спільного проекту «Створення німецько-української університетської мережі для забезпечення успішної освіти в українських університетах під час війни та кризи» за підтримки програми DAAD «Україна цифрова: Забезпечення академічної успішності в умовах кризи, 2023».*

This monograph explores the current challenges of sustainability governance in global value chains, taking into account the tasks of European integration facing Ukrainian industries. The authors highlight the trends in the circular economy as a way of managing the sustainable development of the metallurgical industry and discuss the prospects for sustainable transformation of the energy sector as an essential component of Ukraine’s post-war reconstruction. The presented research results may be of interest to scientists, lecturers, government officials as well as business managers.

*This publication was prepared by the Dnipro University of Technology within the International joint project “Establishment of German-Ukrainian University Network for Securing Successful Education in Ukrainian Universities in Time of War and Crisis”, under the financial support from the DAAD program “Ukraine digital: Ensuring academic success in times of crisis, 2023”*

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



DAAD

Deutscher Akademischer Austauschdienst  
German Academic Exchange Service

**ISBN 978-3-00-080706**