
СВІТОВА ЕКОНОМІКА

DOI: 10.31617/3.2024(135)03
УДК 502.175:339.92

МАКСИМОВА Ірина,
к. е. н., доцент, завідувач кафедри
міжнародних відносин
Державного університету економіки
і технологій
вул. Медична, 16, м. Кривий Ріг,
50005, Україна,
ORCID: 0000-0001-9754-0414
Maksimova_ii@kneu.dp.ua

MAKSYMOVA Iryna,
PhD (Economics), Associate Professor,
Head at the Department of International
Relations, State University of Economics
and Technology
16, Medichna St., Kryvyi Rih, 50005, Ukraine
ORCID: 0000-0001-9754-0414
Maksimova_ii@kneu.dp.ua

ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ СВІТОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Розглянуто вплив цифровізації на глобальні процеси декарбонізації світової економіки. На прикладі світової енергетики та промисловості показано стратегічні перспективи реалізації подвійного зеленого-цифрового переходу для досягнення кліматичної нейтральності. Визначено ключові напрями цифрової трансформації у цих секторах. Висунуто гіпотезу, що цифрова трансформація в енергетиці та промисловості фасилітує декарбонізацію індустрій і сприяє досягненню кліматичної нейтральності світової економіки. Методологія дослідження ґрунтується на дедуктивний та системний аналіз досвіду ЄС щодо зелених-цифрових рішень, кількісні оцінки їх результативності та форсайт-прогнози. Стаття аналізує галузеву структуру вуглецевого сліду світової економіки, демонструючи значний потенціал цифрових інновацій у зменшенні викидів і підвищенні енергоефективності. Можливості цифровізації у напрямі енергетичного переходу сприяють розвитку енергоринку, оптимізації споживання, пропонуючи самоорганізовані мікроенергомережі, рішення "енергія як послуга" та нові покоління цифрових технологій для альтернативної енергетики. У сфері промисловості цифровізація розглянута як драйвер "розумного" виробництва, циркулярних практик, цифрового відстеження матеріалів та оптимізації структури споживання. Стаття акцентує увагу на важливості міждисциплінарної співпраці й інтеграції цифрових рішень для

DECARBONIZATION OF GLOBAL INDUSTRY

The impact of digitalisation on the global processes of decarbonisation of the world economy is considered. Using the example of global energy and industry, the strategic prospects for implementing a double green-digital transition to achieve climate neutrality are shown. The key areas of digital transformation in these sectors have been identified. It is hypothesized that digital transformation in energy and industry facilitates the decarbonization of industries and contributes to the achievement of climate neutrality in the global economy. The research methodology is based on a deductive and systematic analysis of the EU's experience in the field of green-digital solutions, quantitative assessments of their effectiveness and foresight forecasts. The article analyses the sectoral structure of the global economy's carbon footprint, demonstrating the significant potential of digital innovations in reducing emissions and increasing energy efficiency. The digitalisation opportunities in the direction of energy transition contribute to the development of the energy market, optimisation of consumption, offering self-organised micro-energy networks, energy-as-a-service solutions and new generations of digital technologies for alternative energy. In the industrial sector, digitalisation is considered as a driver of "smart" manufacturing, circular practices, digital material tracking and optimisation of consumption structure. The article



Copyright © 2024, Автор(и). Це стаття відкритого доступу, яка розповсюджується на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License 4.0 (CC-BY) Міжнародна ліцензія, (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

забезпечення успішного зеленого-цифрового переходу та досягнення кліматичної нейтральності світової економіки.

Ключові слова: світова економіка, зелений-цифровий перехід, цифровізація, кліматична нейтральність, світова промисловість, енергетика, енергія як послуга.

emphasises the importance of international cooperation and integration of digital solutions to ensure a successful green-digital transition and achieve climate neutrality of the global economy.

Keywords: global economy, green-digital transition, digitalisation, climate neutrality, global industry, energy, energy, energy-as-a-service.

JEL Classification: F01, Q55, O33, L60, O44.

Вступ

Світова економіка розвивається у надзвичайно динамічному середовищі потужних мегатрендів сучасності, які можуть створювати унікальні симбіотичні поєднання. Одним з яскравих прикладів такої синергії є гармонійне поєднання цифрового та зеленого мейнстримів. З огляду на загальносвітову "лояльність до диджитал" та високі темпи цифрового прогресу виникає інтерес до вивчення можливостей застосування потенціалу цифрової трансформації для забезпечення цілей зеленого переходу світової економіки.

За останні півстоліття викиди парникових газів збільшилися на понад 70% через екстенсивне зростання світових індустрій, що зазначає міжурядова група експертів зі зміни клімату *IPCC* (2021). Така динаміка зберігається досі, провокуючи все більш жорсткі наслідки зміни клімату. Проблему загострює енергетична залежність світової економіки. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства *IEA* (2023), глобальне споживання енергії до 2050 р. може зрости на 50% через збільшення попиту на енергоносії в умовах загострення геополітичної ситуації у світі, війни росії проти України, світового зростання темпів урбанізації та виробництва.

Підтримка кліматичної безпеки потребує від міжнародної спільноти дедалі більших зусиль і фінансових витрат. На рівні світової економіки зміна клімату призводить до значних економічних збитків, які масштабне дослідження *Newman & Noy* (2023) оцінює у 2.8 трлн дол. США за останні 20 років, або 143 млрд дол. США щорічно. Більш того, за прогнозами науковців *Chapagain et al.* (2020) та *Iizumi et al.* (2020), до 2050 р. прямі втрати світової економіки від наслідків зміни клімату становитимуть 1.7–3.1 трлн дол. США додатково.

У своєму форсайті *European Commission* (2022) акцентує увагу на необхідності подвійного "зеленого та цифрового" переходу світової економіки. За оцінками *McKinsey* (2020), впровадження цифрових технологій може знизити викиди в промисловості на 15–20% до 2030 р. завдяки оптимізації процесів виробництва та підвищенню енергоефективності. *Bauer et al.* (2021), *Nativi et al.* (2021) та *Mondejar et al.* (2021) приділяють особливу увагу взаємозв'язку між екологічним і цифровим вимірами, зокрема у розробці "цифрового двійника" Землі для кліматичної стійкості. Роботи (*Geels et al.*, 2017; *Victor et al.*, 2019; *Midttun & Piccini*, 2017), підкреслюють ключову роль IT-кластерів у досягненні

кліматичної стабільності, особливо в таких забруднюючих галузях, як металургія, сільське господарство, енергоспоживання та транспорт. Це питання стає особливо актуальним у контексті активної глобальної інтеграції. На думку *Argyriou et al.* (2021), кліматична інтеграція стає необхідною умовою, а цифровий доступ – рушійною силою зеленого зростання, яке виходить за рамки ринкових аспектів. Дослідження *Hao et al.* (2023) демонструє, що цифрова трансформація економіки значно впливає на інклюзивне зелене зростання, діючи на такі фактори, як енергоспоживання, екологічне забруднення, економічне зростання, людський капітал, промислова структура та технологічний прогрес. Як зазначають *Ren et al.* (2022), глобальний тренд "цифровізації заради декарбонізації" потребує переосмислення економічної парадигми та здатності сучасної політики підтримувати зелені-цифрові ініціативи.

Водночас науковому дискурсу дещо бракує системності у представленні глобальної цифрової парадигми зеленого переходу в розрізі впливу цифрових технологій на кліматичні результати в окремих галузях господарювання.

Відтак, гіпотеза дослідження полягає в тому, що впровадження цифрових технологій у таких галузях світової економіки, як енергетика та промисловість, дасть змогу значно прискорити процес декарбонізації та сприятиме досягненню кліматичної нейтральності у найближчі десятиліття завдяки інтеграції кращих практик подвійного цифрового та зеленого переходу.

Метою статті є визначення ключових можливостей цифровізації для досягнення кліматичної нейтральності у найбільш вуглецевоінтенсивних галузях світової економіки, як-от енергетика та промислове виробництво.

В основу дослідження покладено аналіз наявного досвіду ЄС щодо реалізації зеленого-цифрового переходу економіки. Базу дослідження становлять міжнародні аналітичні документи та наукові напрацювання. Це уможливило систематизувати ключові напрями цифрових рішень для декарбонізації окремих індустрій, що в перспективі може бути покладено в основу стратегування кліматично-нейтрального розвитку світової економіки.

У змістовній частині статті, яка складається з трьох розділів, основну увагу приділено аналізу цифрового-зеленого переходу енергетичної галузі та сучасного промислового виробництва, які наразі формують лівову частку вуглецевого сліду світової економіки.

1. Галузева структура вуглецевого сліду світової економіки та ініціативи зеленого-цифрового переходу

Кліматична нейтральність виступає своєрідним орієнтиром зеленого розвитку світової економіки, а Європейський Союз амбітно визначає 2050-ий роком досягнення "нульових" викидів. Подвійний зелений-

цифровий перехід сприяє декарбонізації світової економіки, що, своєю чергою, потребує забезпечення максимальної повсюдності поширення кращих практик цифровізації й екологізації серед усіх суб'єктів господарювання.

З іншого боку, досягнення кліматичної нейтральності потребує декарбонізації всіх секторів економіки. Однак їх вуглецевий слід значним чином варіює у загальній сукупності викидів (рис. 1).



Рис. 1. Галузева структура вуглецевого сліду економіки

Джерело: побудовано на основі статистики *Global Carbon Budget* (2023).

Наведена діаграма репрезентує структуру вуглецевого сліду світової економіки у розрізі окремих галузей. Енергетика є найбільшим джерелом викидів вуглецю як в ЄС (38%), так і у світі (30%), що підкреслює значення цієї галузі в екологічній політиці та необхідність зменшення залежності від вуглецевих джерел енергії. Транспортна галузь також є значним контрибутором викидів на глобальному рівні (27.5%) і дещо меншим в економіці ЄС (20.7%). Більший розрив спостерігається у будівельній галузі (17 % у світі та 8.9% у структурі викидів ЄС).

Важливим аспектом є виокремлення обсягу викидів, отриманих внаслідок спалювання енергоносіїв, від вуглецю, який генерується безпосередньо під час виробництва. Такий підхід дає змогу оцінювати процес декарбонізації світових індустрій у двох вимірах: декарбонізація конкретних виробничих процесів (лиття металу, виробництво цементу чи хімікатів); зниження енергоємності виробництва. Як бачимо, під час спалювання енергоносіїв утворюється практично вдвічі більше викидів

порівняно з безпосереднім виробництвом. Водночас окреим пунктом є виробництво палива як такого, що нині становить 5.4 % вуглецевого сліду світової економіки та 6.6% у ЄС. Діаграма (рис. 1) показує, що станом на 2023 р. найменша частка викидів припадає на сільське господарство (0.4%), а також утилізацію відходів (0.22% у світі та 0.04% у ЄС).

Попри різний характер внеску галузей у загальну сукупність викидів, існує необхідність комплексного підходу до зниження викидів, який охоплює різні сектори економіки та передбачає заходи з підвищення енергоефективності, інноваційного розвитку й управління відходами.

Досвід країн ЄС є одним з показових у розробці стратегій та впровадженні практик зеленого-цифрового переходу. Деякі з ініціатив узагальнено у таблиці за окремими галузями економіки (таблиця).

Таблиця

Кліматично-нейтральні ініціативи зеленого-цифрового переходу в ЄС

Ініціатива	Вплив на кліматичну нейтральність	Фокус
"Energiewende" (Німеччина) Впровадження смартмереж та відновлюваних джерел енергії для оптимізації споживання енергії	Зменшення викидів CO ₂ через використання відновлюваних джерел енергії	Державне управління, великий бізнес
"Smart Grid Gotland" (Швеція) Розвиток смартмереж для інтеграції відновлюваних джерел енергії	Підвищення ефективності використання енергії та зниження викидів парникових газів	Державне управління, великий бізнес, громадяни
"Smart City Amsterdam" (Нідерланди). Впровадження смарттехнологій для управління міськими ресурсами, включно з транспортом	Скорочення викидів CO ₂ через оптимізацію транспортних потоків та розвиток громадського транспорту	Державне управління, великий бізнес, громадяни
"Electric Mobility" (Франція) Розвиток інфраструктури для електромобілів та впровадження AI для управління зарядними станціями	Зниження викидів CO ₂ через перехід на електромобілі та ефективне управління енергоспоживанням	
"Superbonus 110%" (Італія) "Smart Buildings" (Фінляндія) Фінансування енергоефективних проєктів будівництва на основі цифрових технологій	Підвищення енергоефективності будівель та зниження викидів парникових газів	Державне управління, громадяни
"Digital Farming" (Данія) Використання AI та IoT для оптимізації аграрних процесів і зменшення впливу на довкілля	Зниження викидів парникових газів через оптимізацію добрив та води	Великий бізнес, малий бізнес (SME), фермери
"Smart Agriculture" (Іспанія) Використання великих даних для управління сільськогосподарськими процесами	Підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва та зменшення викидів парникових газів	

Джерело: узагальнено на основі дослідження цифрових ресурсів DIGITALEUROPE (2024) та European Commission (2024).

Зазначені ініціативи в країнах ЄС передбачають гармонійне поєднання трендів зеленого розвитку та можливості цифровізації задля прямого чи опосередкованого зниження викидів і досягнення кліматичної нейтральності у майбутньому. Водночас реалізація подвійного зеленого-цифрового переходу має певні особливості та виклики у різних галузях економіки, які доречно розглянути окремо у найбільш вуглецевоінтенсивних галузях економіки.

2. Зелений перехід світової енергетичної галузі на засадах цифровізації

Енергетичний сектор продукує найбільше викидів вуглецю в структурі вуглецевого сліду економіки ЄС та світу. Зростання доступності та відносно зниження вартості технологій відновлюваної енергії в останнє десятиріччя висунуло енергетичний сектор в авангард кліматичних політик. Більш того, дослідження *Victoria et al. (2020)* показує, що першочергове та постійне скорочення викидів у цьому секторі є найбільш економічно ефективним шляхом до кліматичної нейтральності. Відносно падіння цін на різні види енергії наведено нижче (рис. 2).

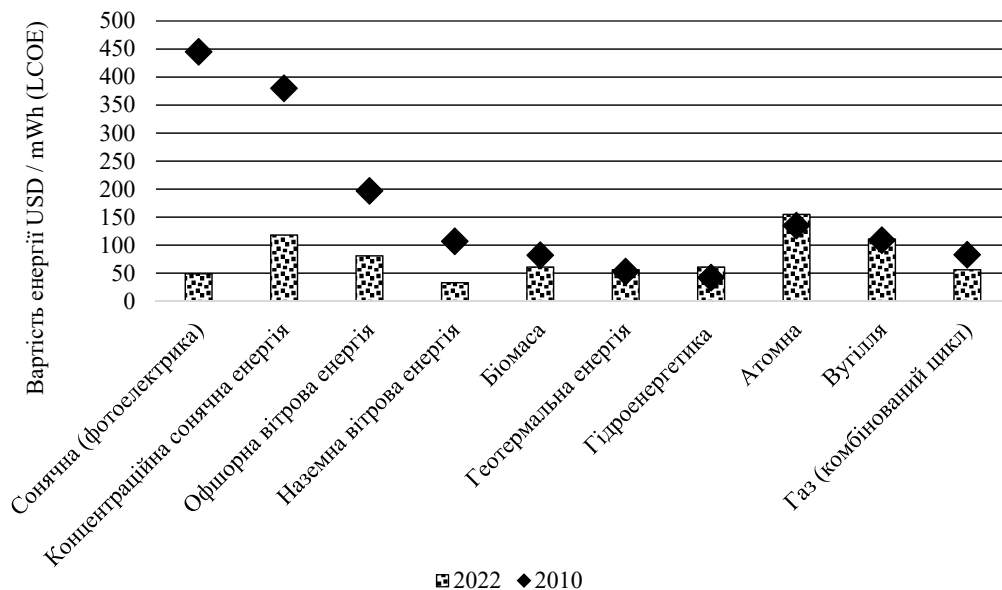


Рис. 2. Динаміка падіння вартості енергії *LCOE* (за видами) у світі впродовж 2010–2022 рр., дол. США /кВт-год

Джерело: побудовано автором на основі звіту *Irena (2023)*.

Як бачимо, відбулося стрімке падіння вартості виробництва альтернативної енергії. Всього за одне десятиліття вартість сонячної енергії знизилася на 89%, вітрової енергії – на 69%, біомаси – на 25%. Таке зниження вартості альтернативної енергетики є потужним важелем зеленого переходу світового енергетичного ринку. Впродовж останнього

десятиліття енергетична галузь економіки демонструє дві позитивні тенденції у напрямі досягнення кліматичної нейтральності – збільшення частки використання відновлювальної енергії з 16.7% у 2013 р. до 23.2% у 2023 р. на тлі скорочення споживання первинної з 1380 млн т нафтового еквівалента до 1260 млн т відповідно з 2013 по 2023 р.

Військова агресія росії проти України прискорила зміну парадигми енергетичної галузі ЄС у бік збільшення енергетичної незалежності та захисту критичної енергетичної інфраструктури. У цих умовах важливими акцентами зеленого-цифрового переходу енергетики з урахуванням завдань досягнення "чистого нуля" викидів згідно з *European Commission* (2022) є:

- безпечне енергопостачання та захист цифрової енергетичної системи від кібератак і можливих збоїв ІТ-систем;
- зменшення потреби в імпорті викопного палива на тлі зростання цін на енергоносії, що зумовлює необхідність економії енергії та підвищення енергоефективності;
- потреба прискорити трансформацію енергії в бік відновлюваних і чистих джерел, щоб зменшити енергетичну залежність.

Брифінг міжнародних агенцій *EU Briefing* (2022) показав, що заходи на підтримку відновлюваної енергетики й енергоефективності можуть зменшити залежність ЄС від імпорту російського газу на дві третини до 2025 р. через впровадження пакета "*Fit for 55*".

Кліматично нейтральне виробництво електроенергії стає основою зеленого переходу. Вітрова та сонячна енергія залишаються найбільш економічно ефективним способом виробництва альтернативної електроенергії. Цю тенденцію характеризує динаміка світових інвестицій у відновлювальну енергетику *Irena* (2023), лівова частка яких охоплює сонячну та вітрову енергію, які за останні 15 років сформували потужний пул світового енергетичного ринку (більш ніж 90%).

Як зазначають *Oliveira et al.* (2021), важливим напрямом зеленого-цифрового переходу енергетики є також розробка водневих технологій, насамперед стосовно заміни традиційного палива. "Зелений водень" можна використовувати в багатьох сферах, включно з авіацією, міжміськими автомобільними перевезеннями, опаленням житлових будинків і промисловістю. Розвиток Водневого Банку ЄС є одним із векторів підтримки такої ініціативи. *European Commission* (2022) прогнозує, що паливо з нульовим вмістом вуглецю, як-от водень, має замінити викопне паливо там, де електрифікація неможлива.

Згідно зі звітом *International Energy Agency* (2023) ЄС активно впроваджує цифрові інструменти для моделювання попиту на електроенергію, паралельно використовуючи моделі гейміфікації та метаверси для коригування поведінки і звичок споживачів при споживанні енергії. Цифровізація є ключовим інструментом для розвитку самоорганізованих енергомереж, що мають вирішальне значення для роботи зі все

більш децентралізованою та змінною структурою виробництва електроенергії в ЄС (Victoria, 2023). Такі створені самоорганізовані мікромережі є невеликими енергосистемами, які можна з'єднувати між собою за необхідності взаємопосилення. Їх використання видається особливо перспективним, адже за прогнозами аналітиків *International Energy Agency* (2023) до 2050 р. навантаження на електромережі зросте удвічі, зокрема через зарядку електротранспорту. З погляду безпеки, такі системи дають змогу відносно легко запобігати відключенням та відновлювати постачання електроенергії за руйнувань інфраструктури, що спричинені екстремальними наслідками зміни клімату. Водночас згідно з Borowski (2021) цей важливий напрям енергетичного переходу стає можливим виключно за умов повсюдної цифровізації, яка спирається на широку інтеграцію ІКТ та в перспективі – технологій блокчейну.

Більш того, самоорганізовані сітки мікромереж є драйвером розвитку локальних енергоринків ЄС за рахунок зниження домінування великих гравців та ширшого залучення домогосподарств як постачальників надлишку енергії на засадах ринкової конкуренції. Аналітика *Allied Market Research* (2022) показує, що світовий ринок мікромереж у 2030 р. становитиме 55–190 млрд євро.

На тлі окреслених вище тенденцій з'являється нова інноваційна цифроорієнтована бізнес-модель *Energy-as-a-Service (EaaS)*, яка змінює спосіб взаємодії постачальників і споживачів енергії. Наразі постачальники енергії пропонують кінцевим споживачам електроенергію, паливо та тепло. *EaaS* – це інший підхід, коли постачальник енергетичних послуг пропонує кінцевим споживачам нові способи енергетичних рішень, які передбачають не певний вид енергії, а радше "енергетичний продукт під ключ" (*Allied Market Research*, 2022). Проявами бізнес-моделі *EaaS* є широкий спектр рішень, включаючи енергоефективність, забезпечення відновлюваною енергією та рішення для стабілізації електромереж. Основна перевага *EaaS* для кінцевих користувачів полягає в тому, що ця модель зменшує потребу в початкових інвестиціях і спрощує постачання енергії. Відповідно до форсайту *European Commission* (2022) "енергія як послуга" – це висхідний сегмент енергоринку з очікуваним сукупним річним темпом зростання 7.6 % до 2030 р. та ринковою капіталізацією 113 млрд євро, що може сприяти створенню робочих місць і збільшенню рівня інноваційності. Більш того, згідно з *Mongo et al.* (2022) *EaaS* може зменшити енергетичну бідність в країнах завдяки оптимізації цін на енергетичні послуги та заохочення найбільш енерго- і економічно ефективних постачальників. Однак впровадження *EaaS* передбачає більшу прозорість у частині обміну даними між споживачами мереж та постачальниками стосовно використання енергії, що потребуватиме додаткових протоколів цифрової безпеки.

Загалом досягнення кліматичної нейтральності за рахунок реалізації зеленого-цифрового переходу в енергетичній галузі потребуватиме узгоджених політик щодо переорієнтації енергетичної системи ЄС на

кліматично орієнтований розвиток, посилення нормативної бази в питаннях регулювання викидів, підтримки виходу на енергоринок нових гравців, подолання можливого опору суспільства щодо переходу на нові моделі енергоспоживання, а також попередження можливого ефекту відскоку.

3. Підходи до зеленого-цифрового переходу промисловості

Сучасна промисловість має не тільки великий вплив на навколишнє середовище, але й вирішальне значення для розвитку економіки та суспільства. Згідно з розрахунками *Global Carbon Budget* (2023) близько 70% глобальних викидів вуглекислого газу генерують 4 сектори сучасної промисловості: виробництво сталі; виробництво цементу; виробництво хімікатів і целюлозно-паперове виробництво. Зазначимо, що перші три вже підпадають під новий механізм ЄС щодо вуглецевого коригування імпорту *CBAM*¹.

Військова агресія росії проти України загрожує енергоємним галузям виробництва, оскільки вони здебільшого покладаються на викопне паливо як важливу сировину для генерації енергії. Як показує аналіз *Stoker et al.* (2023), в умовах гострого дефіциту газу уряди країн ЄС можуть вживати надзвичайних заходів для прийняття рішення щодо його пріоритетного розподілу, які, втім, не завжди є ефективними і призводять до простоїв.

Хоча питання впровадження низьковуглецевих практик надзвичайно важливе у контексті зазначеної проблематики, воно є одним з найскладніших саме у сфері промислового виробництва. Одним із рішень є водневі технології, які тривалий час залишалися нерентабельними порівняно з традиційними варіантами енергопостачання промислових підприємств. Проте потроєння цін на природний газ у період з березня 2021 по 2022 р. стимулювало розгляд виробництва водню серед когорти конкурентних рішень.

З іншого боку, в останні 10 років промисловість переживає значний зсув від класичного виробництва до надання послуг у цілісних пакетах продуктів і сервісів, поступово ліквідуючи межу між вторинним і третинним секторами на тлі зростання технологічної інтенсивності (*European Commission*, 2023). У цих умовах загострення дефіциту ресурсів сприймається як тенденція, яка може чинити тиск на енергоємні галузі через їх сильну залежність від енергії, джерелом якої поки що є викопне паливо у переважній більшості випадків. Цей дефіцит частково перекриває поява цифрових технологій, які пропонують ефективні альтернативні рішення, як, наприклад, 3D-друк. На думку *Hedberg & Sipka* (2020), така тенденція стимулює перехід гравців сучасної промисловості від покупки продуктів до покупки послуг.

¹ Механізм вуглецевого коригування імпорту (*Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM*) впроваджено Європейським Союзом з 30 жовтня 2023 р.

Безумовно, декарбонізація промисловості важлива для забезпечення кліматичної нейтральності світової економіки. Однак аналітика *European Commission* (2022) акцентує увагу на тому, що значна частина скорочення викидів парникових газів (на 15–30%) в енергоємних секторах промисловості за останні 30 років досягнута завдяки підвищенню енергоефективності, а не трансформації виробничих моделей. Водночас зазначається, що подальші заходи щодо підвищення ефективності потребують проривних технологій.

У цьому контексті роль цифровізації стає дедалі важливішою і набуває більш комплексного та всеосяжного характеру, що відображається у динаміці приросту розумного виробництва у світі (рис. 3).

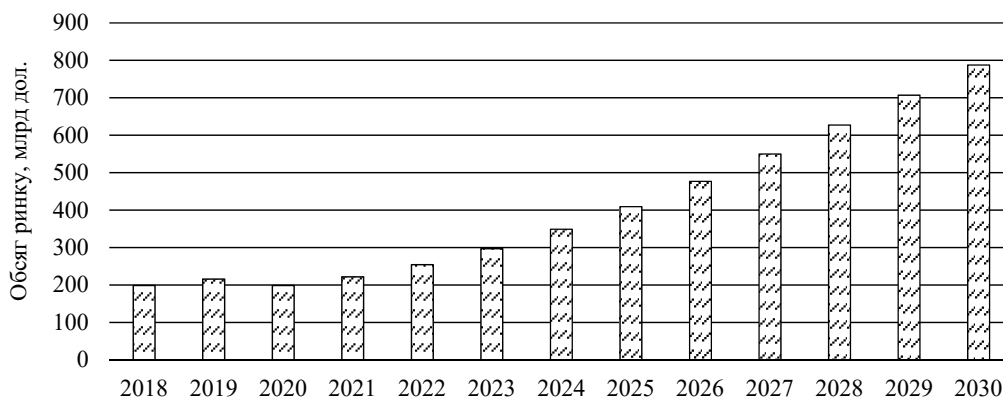


Рис. 3. Прогноз динаміки розумного виробництва у світі

Джерело: побудовано на основі статистики *GVG* (2024).

Як бачимо, у 2023 р. світовий ринок розумного виробництва оцінювався у 254.24 млрд дол. США і, як очікується, зростатиме на 14.9% у період з 2023-го по 2030 р. Розвиток таких потужних напрямів, як Індустрія 4.0., кібер-фізичні системи та штучний інтелект, фактично привів до політики, яка стимулює інтеграцію виробництва, інформаційних технологій та інновацій в ЄС та світі. Згідно з *Lu et al.* (2020) у подвійному переході важливу роль відіграють цифрові двійники промислових об'єктів, що допомагають ідентифікувати оптимальний екологічний варіант розвитку виробничих систем за допомогою моделювання і прогнозування.

Зважаючи на досяжність кліматичної нейтральності, перспективним напрямом зеленого-цифрового переходу промисловості є оптимізація матеріалів на основі даних. Цей підхід базується на інтеграції штучного інтелекту для аналітики великих даних, машинному навчанні та розробці цифрових двійників, що допомагає вдосконалювати наявні матеріали та процеси, а також розробляти нові покоління матеріалів (*Pollice et al.*, 2021). За результатами звіту *European Commission* (2022) до 2050 р. очікується зростання попиту на вуглецевоємні матеріали на 10–30%, передусім для виробництва цементу, сталі, добрив та алюмінію. Кліматично-нейтральний

розвиток промисловості потребує пошуку екологічних альтернатив і продовження терміну служби матеріалів у життєвому циклі продуктів. Дослідження колективу американських науковців показало, що розробка нових матеріалів традиційними методами може займати до 20–30 років, що значно уповільнює технологічні інновації та їх впровадження у промисловість (Tabor et al., 2018). Такий лаг може виявитися критичним з огляду на терміновість впровадження нових екологічних виробничих практик задля досягнення кліматичної нейтральності до 2050 р. Цифровізація може посприяти скороченню часу, необхідного для розробки нових матеріалів, і допомогти керувати складністю процесів оптимізації, закладаючи у розрахунок екологічні критерії.

Іншим важливим напрямом подвійного переходу у промисловості є цифрове відстеження матеріалів у реальному часі. Нині ЄС розробляє рішення для такого відстеження на основі технології блокчейну та інтернету речей. Окрім переліченого, цифрові паспорти продукту надають інформацію про повний ланцюжок створення вартості продукту і у такий спосіб підвищують прозорість, що допомагає споживачам робити екологічніший вибір і полегшує переробку. Цифрові паспорти продуктів також можуть використовуватися органами влади для перевірки відповідності зеленим стандартам.

Цифрове відстеження матеріалів має великий потенціал у досягненні кліматичної нейтральності промислового виробництва. Однак дискусійним питанням залишається забезпечення конкурентоспроможності вторинних матеріалів, адже їх екологічна переробка може мати більшу "зелену націнку" порівняно з вартістю первинної сировини. Іншою проблемою є забезпечення безпеки передачі даних та їх конфіденційності.

Загалом подвійний перехід промисловості у напрямі забезпечення її кліматичної нейтральності є складним викликом, що потребує значної підтримки дослідницької й інноваційної діяльності в цій сфері, впровадження практик циркулярності, розвитку нормативного забезпечення та протоколів інформаційної безпеки для повсюдного моніторингу руху матеріалів, кращого розуміння моделей споживання; чіткого цілепокладання і публічно-приватного партнерства на міжнародному рівні.

Висновки

Аналіз досвіду ЄС у реалізації подвійного зеленого-цифрового переходу підкреслює важливість інтеграції цифрових рішень для забезпечення кліматичної нейтральності найбільш вуглецевоінтенсивних галузей.

Результати дослідження підтвердили гіпотезу, що впровадження відповідних цифрових технологій у таких ключових галузях світової економіки, як енергетика і промисловість, суттєво прискорює процес декарбонізації та сприяє досягненню кліматичної нейтральності. Проведений аналіз показав, що інтеграція кращих практик подвійного

цифрового і зеленого переходу вже приводить до значного зниження викидів парникових газів та підвищення ефективності використання ресурсів. Аналіз оприлюднених звітів міжнародних інституцій дав змогу дійти висновку, що цифрові технології, як-от штучний інтелект, інтернет речей, блокчейн і великі дані, не лише оптимізують процеси управління та моніторингу, але й створюють нові можливості для розвитку зеленої економіки. Це підтверджує тезу, що комплексний підхід до цифровізації й декарбонізації є одним із ключових чинників досягнення кліматичної нейтральності у найближчі десятиліття.

Зокрема, впровадження цифрових інструментів у сферу енергетики сприяє більшій децентралізації енергетичних ринків і розвитку самоорганізованих мікромереж, що є важливим для стабільного енергозабезпечення в умовах кліматичних викликів. Створення і розвиток нової бізнес-моделі "енергія як послуга" уможлиблює оптимізувати споживання енергії, знижуючи витрати на початкові інвестиції та підвищуючи доступність низьковуглецевих енергетичних рішень. Водночас впровадження водневих технологій стає важливим елементом переходу на екологічно чисті джерела енергії в промислових процесах. Зниження вартості виробництва відновлювальної енергії, зокрема сонячної та вітрової, сприяє активному розвитку цих напрямів та їх інтеграції в енергетичний ринок. Розумне виробництво, яке базується на інтеграції цифрових двійників та штучного інтелекту, стає ключовим напрямом подвійного переходу промисловості. Ці технології дають змогу оптимізувати виробничі процеси, знижуючи вуглецевий слід та збільшуючи ефективність використання ресурсів. Важливим аспектом також є цифрове відстеження матеріалів, що забезпечує прозорість у всьому ланцюжку створення вартості продукту і сприяє зниженню його вуглецевого сліду.

Цифровізація є важливим драйвером досягнення кліматичної нейтральності, що пропонує прогресивні можливості для оптимізації процесів у різних секторах економіки. Для реалізації цього потенціалу необхідна міжнародна підтримка з боку держав і бізнесу задля забезпечення повсюдності цифрового-зеленого переходу.

Відтак, подальші дослідження будуть присвячені розробці моделей міжнародної співпраці, зокрема публічно-приватного партнерства, а також вивченню їх ефективності у різних регіонах світу з урахуванням специфічних економічних, екологічних умов та цифрового потенціалу реалізації.

REFERENCE

- Allied Market Research. (2022). *Energy as a Service (EAAS) Market Analysis – 2021*. <https://www.alliedmarketresearch.com/energy-as-a-service-eaas-market-A06878>
- Argyriou, A. S., Lyzun, M., Lishchynskyy, I., Savelyev, Y., Kuryliak, V., Ivashkiv, I., & Sachenko, S. (2021, September). Modeling the Stabilization Factors of Monetary Unions in turbulent economics. In *2021 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* (2), 749–754). IEEE.

- Bauer, P., Stevens, B., & Hazeleger, W. (2021). A digital twin of Earth for the green transition. *Nature Climate Change*, 11(2), 80–83.
- Borowski, P. F. (2021). Digitization, digital twins, blockchain, and industry 4.0 as elements of management process in enterprises in the energy sector. *Energies*, 14(7), 1885.
- Chapagain D. et al. (2020). Climate change adaptation costs in developing countries: insights from existing estimates. *Climate and development*, 12(10), 934–942. <https://doi.org/10.1080/17565529.2020.1711698>
- DIGITALEUROPE. (n. d.). *The voice of digitally transforming industries in Europe*. Retrieved 2024, 9 August from <https://www.digitaleurope.org/>
- EU Briefing. (2022). *EU can stop Russian gas imports by 2025: Accelerating clean energy avoids fossil lock-in*. Bellona Europa, Ember, RAP, & E3G. <https://ember-climate.org/app/uploads/2022/03/EU-can-stop-Russian-gasimports-by-2025.pdf>
- European Commission. (2022). *Twinning the green and digital transitions in the new geopolitical context*. Publications office of the European Union. <https://doi.org/10.2792/022240>
- European Commission. (2024) *European innovation scoreboard 2024. EIS interactive tool*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/statistics/performance-indicators/european-innovation-scoreboard_en
- Geels, F. W., Sovacool, B. K., Schwanen, T., & Sorrell, S. (2017). Sociotechnical transitions for deep decarbonization. *Science*, 357(6357), 1242–1244. <https://doi.org/10.1126/science.aao3760>
- Global Carbon Budget 2023 – with major processing by Our World in Data. (2023). Annual CO₂ emissions – GCB [dataset]. Global Carbon Project, “Global Carbon Budget” [original data].
- GVG. (2024). *Smart Agriculture Market Size (Precision farming, Livestock Monitoring, Smart greenhouse, and Others), By Application, By Offering, And Segment Forecasts, 2024 – 2030*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/smart-agriculture-farming-market>
- Hao, X., Li, Y., Ren, S., Wu, H., & Hao, Y. (2023). The role of digitalization on green economic growth: Does industrial structure optimization and green innovation matter? *Journal of environmental management*, (325), 116504.
- Hedberg, A., & Sipka, S. (2020). *Improving biodiversity: How can digitalisation help?* European Policy Centre. <https://www.epc.eu/en/Publications/Improving-biodiversity-How-can-digitalisation-help~38bd64>
- Iizumi, T., Shen, Z., Furuya, J., Koizumi, T., Furuhashi, G., Kim, W., & Nishimori, M. (2020). Climate change adaptation cost and residual damage to global crop production. *Climate Research*, 80(3), 203–218. <https://doi.org/10.3354/cr01605>
- IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IRENA. (2023). *Renewable power generation costs in 2022*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Lu, Y., Liu, C., Kevin, I., Wang, K., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, (61), 101837.
- McKinsey. (2020). *The future of work in Europe: Automation, workforce transitions, and the shifting geography of employment*. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/the-future-of-work-in-europe>
- Midttun, A., & Piccini, P. B. (2017). Facing the climate and digital challenge: European energy industry from boom to crisis and transformation. *Energy Policy*, (108), 330–343.
- Mondejar, M. E., Avtar, R., Diaz, H. L. B., Dubey, R. K., Esteban, J., Gómez-Morales, A., ... Garcia-Segura, S. (2021). Digitalization to achieve sustainable development goals: Steps towards a Smart Green Planet. *Science of The Total Environment*, (794), 148539.
- Mongo, M., Laforest, V., Belaïd, F., & Tanguy, A. (2021). Assessment of the Impact of the Circular Economy on CO₂ Emissions in Europe. *Journal of Innovation Economics & Management*. <https://doi.org/10.3917/jie.pr1.0107>
- Nativi, S., Mazzetti, P., & Craglia, M. (2021). Digital ecosystems for developing digital twins of the earth: The destination earth case. *Remote Sensing*, 13(11), 2119.

- Newman, R., & Noy, I. (2023). The global costs of extreme weather that are attributable to climate change. *Nature Communications*, 14(1), 6103. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41888-1>
- Oliveira, A. M., Beswick, R. R., & Yan, Y. (2021). A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering*, (33), 100701.
- Pollice, R., Gomes, G. P., Aldeghi, M., Hickman, R. J., Krenn, M., Lavigne, C., ... Aspuru-Guzik, A. (2021). Data-Driven Strategies for Accelerated Materials Design. *Accounts of Chemical Research*, (54), 849–860.
- Ren, S., Li, L., Han, Y., Hao, Y., & Wu, H. (2022). The emerging driving force of inclusive green growth: does digital economy agglomeration work?. *Business Strategy and the Environment*, 31(4), 1656–1678.
- Stoker, L., Ghosh, U., & Shao, X. (2023). *Reuters Impact: Global Sustainability Report*. https://www.thomsonreuters.com/en-us/posts/wp-content/uploads/sites/20/2023/10/Sustainability-Report_Reuters-Impact.pdf
- Tabor, D., Roch, L., Saikin, S., Kreisbeck, C., Sheberla, D., Montoya, J., Dwaraknath, S., Aykol, M., Ortiz, C., Tribukait, H., Amador-Bedolla, C., Brabec, C., Maruyama, B., Persson, K., & Aspuru-Guzik, A. (2018). Accelerating the discovery of materials for clean energy in the era of smart automation. *Nature Reviews Materials*, (3), 5–20. <https://doi.org/10.1038/s41578-018-0005-z>
- Victor, D. G., Geels, F. W., & Sharpe, S. (2019). *Accelerating the low carbon transition. The case for stronger, more targeted and coordinated international action*. Brookings.
- Victoria, M., Zhu, K., Brown, T., Andresen, G. B., & Greiner, M. (2020). Early decarbonisation of the European energy system pays off. *Nature Communications*, 11(1), 6223. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20015-4>

Конфлікт інтересів: Автор заявляє, що не має фінансових чи нефінансових конфліктів інтересів щодо цієї публікації; не має відносин із державними органами, комерційними або некомерційними організаціями, які могли б бути зацікавлені у поданні цієї точки зору.

Автор не отримувала прямого фінансування для цього дослідження.

Максимова І. Декарбонізація світової промисловості. *Зовнішня торгівля: економіка, фінанси, право*. 2024. № 4. С. 38-51. Серія. Економічні науки. [https://doi.org/10.31617/3.2024\(135\)03](https://doi.org/10.31617/3.2024(135)03)

Надійшла до редакції 13.08.2024.

Отримано після доопрацювання 19.08.2024.

Прийнято до друку 26.08.2024.

Публікація онлайн 05.09.2024.