

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БАБ'ЯР ВСЕВОЛОД ПАВЛОВИЧ

УДК 338:502.2:330.3(043.3)


ДИСЕРТАЦІЯ
ПРОЦЕСИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ГЛОБАЛЬНОЇ ЦИРКУЛЯРНОЇ
ЕКОНОМІКИ

Спеціальність 051 «Економіка»

Галузь знань 05 «Соціальні та поведінкові науки»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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


В.П. Баб'яр

Науковий керівник:

Зварич Ірина Ярославівна,
завідувач кафедри міжнародної економіки,
доктор економічних наук, професор

Тернопіль – 2026

АНОТАЦІЯ

Баб'яр В. П. – **Процеси декарбонізації глобальної циркулярної економіки.** – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 051 «Економіка». – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У дисертації досліджено процеси формування та розвитку декарбонізації, доведено, що це багатогранна концепція, яка є центральною для розуміння сучасних зусиль щодо боротьби зі зміною клімату, досягнення сталого розвитку та трансформації сучасних індустріальних суспільств. Відображено, що декарбонізація – це не просто технічний термін, він охоплює процеси, системні зміни, нормативні цілі та навіть ширші цивілізаційні трансформації. Її значення з часом змінювалося, відображаючи переходи від вузьких промислових застосувань до складних соціально-екологічних, економічних та технологічних контекстів. Ця концепція діє на кількох функціональних рівнях. З екологічної точки зору, вона спрямована на пом'якшення наслідків зміни клімату та захист природних систем. З економічної точки зору, вона сприяє інноваціям, інвестиціям у зелені технології та переходу до стійких ринків. Технологічно, вона стимулює розвиток та впровадження відновлюваної енергії, енергоефективних рішень та систем управління викидами вуглецю. З юридичної та інституційної точки зору, вона вимагає структур управління, регуляторної політики та спільних міжнародних механізмів для координації дій на всіх рівнях. Разом ці рівні ілюструють, що декарбонізація є за своєю суттю міждисциплінарним та системним явищем.

Встановлено, що онтологічне розуміння декарбонізації підкреслює її фундаментальну природу - одночасно реальний процес і концептуальна основа, яка пов'язує діяльність людини з екологічними результатами. Визнання цього дозволяє суспільствам планувати ефективніше, балансує між технологічним прогресом, економічним розвитком, соціальною справедливістю та екологічним управлінням.

Доведено, що аналіз макрозв'язків у логарифмічній формі підтверджує обернену залежність між ВВП на одну особу та вуглецевою інтенсивністю: економіки з вищим рівнем доходу, як правило, створюють одиницю доданої вартості за нижчого вуглецевого навантаження. Така закономірність емпірично узгоджується з трактуванням декарбонізації як підвищення ресурсоефективності та технологічної й організаційної результативності. Водночас наявність цілі нульових викидів не забезпечує чіткого розмежування підгруп у наявних даних. Розподіли показників істотно перекриваються, особливо серед країн із низьким і середнім доходом, де структура енергетики, технологічний рівень і стартові умови зумовлюють значну варіативність результатів. Це свідчить, що задекларована ціль у межах наявних спостережень швидше корелює з інституційною спроможністю та структурою економіки, ніж виступає самодостатнім детермінантом поточної вуглецевої ефективності.

Проаналізовано, що узагальнення емпіричних результатів засвідчує високу гетерогенність суб'єктів декарбонізації за типом та рівнем управління. Це ускладнює міжгрупову порівнюваність і вимагає аналітичного розмежування територіальних одиниць (країни/регіони/міста) та компаній; для останніх показники ВВП і чисельності населення не формують універсальної бази зіставлення, а отже прямі порівняння можуть змішувати ефекти масштабу та структурні відмінності.

Розповсюдженість довгострокових цілей нульових викидів є максимальною на національному та корпоративному рівнях і суттєво нижчою на рівні міст і регіонів. Такий градієнт узгоджується з інституційною логікою кліматичної політики: формалізація цілей, звітність і моніторинг потребують адміністративної спроможності, доступу до фінансування та координації політик, які в середньому є більш вираженими на рівні держав і великих корпорацій.

Вуглецева інтенсивність як показник вуглецевої ефективності має правосторонньо асиметричний розподіл у всіх територіальних групах; за таких

умов інформативнішими є медіана та міжквартильний інтервал, оскільки вони слабше реагують на крайні спостереження, тоді як середнє значення є чутливим до поодиноких високих величин. Для міст типовий (медіанний) рівень інтенсивності є нижчим, тоді як для країн і регіонів медіанні значення є близькими, що вказує на подібність центральних характеристик розподілу за наявності відмінностей у поширеності високих рівнів інтенсивності.

Обґрунтовано, що сценарні траєкторії викидів до 2050 року характеризуються спадною медіанною динамікою та широким міжквартильним діапазоном, що відображає відмінності у вихідних рівнях викидів, темпах трансформації та параметрах задекларованих цілей. Поділ за наявністю цілі нульових викидів у середньому узгоджується з більш вираженим скороченням у підгрупі з ціллю, однак міжквартильні інтервали істотно перекриваються. Відтак отримані результати доцільно інтерпретувати як описове узгодження доступних даних і загальну спрямованість змін, а не як підтвердження причинного впливу самих декларацій. Впровадження механізмів вуглецевого кордону в Європі має глобальні наслідки, особливо для азійських експортерів. Це створює тиск на гармонізацію систем обліку вуглецю та стандартів звітності про викиди.

Майбутнє глобальної декарбонізації визначатиметься взаємодією між технологічними інноваціями, геополітичною конкуренцією, фінансовою реструктуризацією та ескалацією кліматичних ризиків. Очікується, що як Європа, так і Азія залишатимуться центральними учасниками цього процесу, але їхні траєкторії дедалі більше збігатимуться через глобальні ланцюги поставок, механізми регулювання викидів вуглецю та міжнародні рамки управління кліматом. Водночас перехід стане складнішим через зростання системних витрат, обмеження ресурсів та нерівномірну динаміку розвитку.

Глобальний виклик зміни клімату трансформував енергетичну політику, економічні стратегії та екологічне управління в усьому світі. Концепція декарбонізації як систематичного скорочення викидів вуглекислого газу від

виробництва енергії, промислової діяльності та транспорту, стала центральною стратегією для досягнення екологічної стійкості та пом'якшення наслідків зміни клімату. Перехід до низьковуглецевої економіки вимагає значних інвестицій. За міжнародними оцінками, Україні знадобиться приблизно 524 мільярди доларів на реконструкцію та відновлення, причому значна частина буде виділена на енергетичну інфраструктуру та проекти зеленого переходу. Ці інвестиції створюють можливості для модернізації, але також створюють фіскальні та фінансові проблеми.

Декарбонізація та пов'язані з війною збої суттєво вплинули на важку промисловість. Наприклад, виробництво сталі скоротилося через дефіцит енергії та тиск, пов'язаний з регулюванням викидів вуглецю, компанії скоротили обсяги діяльності, що потенційно вплинуло на тисячі робочих місць. Проте, перехід створює нові можливості працевлаштування у відновлюваній енергетиці (сонячній, вітровій, біоенергетиці), секторах енергоефективності, реконструкції та зеленій інфраструктурі.

У рамках циркулярної економіки ефективність декарбонізації доцільно розглядати як багатовимірну категорію, що охоплює не лише скорочення викидів парникових газів, а й рівень ресурсоефективності, інноваційності, структурної модернізації та інтеграції низьковуглецевих технологій у виробничі процеси. Такий підхід дозволяє перейти від вузького трактування декарбонізації як екологічного процесу до розуміння її як комплексної моделі трансформації економічної системи.

З метою комплексного оцінювання ефективності декарбонізації в умовах циркулярної економіки запропоновано авторську інтегровану модель Індекс гібридної мобільності та декарбонізації «Hybrid Mobility and Decarbonization Index» чи НМДІ, яка поєднує екологічні, економічні та структурні параметри трансформації. Порівняльний аналіз індексу гібридної мобільності та декарбонізації свідчить про суттєві відмінності у моделях низьковуглецевої трансформації між Європейським Союзом, азійськими економіками та Україною.

Ці відмінності формуються під впливом різного рівня технологічного розвитку, структури енергетичних систем, інституційної спроможності, ступеня інтеграції циркулярної економіки та масштабів цифровізації.

Особливістю української моделі є те, що декарбонізація тісно поєднується з питаннями енергетичної безпеки, післявоєнної реконструкції та модернізації інфраструктури. На відміну від багатьох країн Азії, де головним драйвером декарбонізації виступає промислова конкурентоспроможність, або ЄС, де домінує кліматичне регулювання, в Україні основним стимулом низьковуглецевого переходу дедалі більше стає необхідність енергетичної автономізації та відбудови стійкої економіки.

Результати розрахунку свідчать про нерівномірність декарбонізаційної трансформації. Найбільш слабким компонентом моделі залишається рівень циркулярності економіки (CE_n), оскільки в Україні все ще недостатньо розвинені системи переробки відходів, вторинного використання ресурсів та індустріальної симбіозності. Це свідчить про те, що декарбонізація в Україні наразі значною мірою орієнтована на енергетичний перехід, тоді як циркулярний компонент перебуває на етапі формування. Побудована динаміка НМДІ дозволила також сформулювати сценарії розвитку до 2030 року. Базовий сценарій передбачає поступове зростання індексу за рахунок продовження розвитку ВДЕ, цифрової економіки та інтеграції до європейського кліматичного простору.

Процес декарбонізації в Україні не можна розуміти як однорідну національну трансформацію, оскільки регіональні економічні структури суттєво визначають як інтенсивність викидів, так і доцільність стратегій пом'якшення наслідків. Промислові регіони східної та південно-східної України характеризуються високим рівнем викидів парникових газів через концентровану металургію, виробництво енергії на основі вугілля та важку обробку промисловість. На противагу цьому, центральні регіони демонструють змішану структуру, де сільське господарство, транспорт та помірна промислова діяльність сприяють викидам, тоді як західні

регіони загалом демонструють нижчу вуглецеву інтенсивність та більший потенціал для розвитку відновлюваної енергетики, зокрема в біомасі, сонячній енергії та малих гідроенергетичних системах.

У контексті декарбонізації справедливий перехід включає кілька ключових вимірів як трансформація ринку праці, включаючи перепідготовку та перекваліфікацію працівників вугільної та важкої промисловості, регіональна економічна диверсифікація, спрямована на зменшення залежності від моногалузевих економік, механізми соціального захисту, що забезпечують стабільність доходів під час структурних економічних зрушень, участь громад, що дозволяє місцевому населенню брати участь у процесах прийняття рішень щодо енергетичної та промислової трансформації.

Сценарії декарбонізації Східної України демонструють, що найбільш збалансованими за обсягом витрат і ефективності є заходи з підвищення енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Електрифікація промисловості має значний потенціал скорочення викидів, проте потребує суттєвих інвестицій у модернізацію інфраструктури. Воднева металургія забезпечує один із найвищих рівнів результату скорочення викидів, але її впровадження обмежене високою вартістю та технологічною складністю. Повна системна модернізація дозволяє досягти максимального ефекту декарбонізації, проте є капіталомісткою та потребує довгострокового стратегічного планування. Загалом ефективний перехід вимагає комбінування кількох сценаріїв.

Центральні регіони України, включаючи Полтавську, Черкаську, Вінницьку, Кіровоградську та Київську області (за винятком столиці), характеризуються більш збалансованою економічною структурою з потужною сільськогосподарською базою та помірним промисловим розвитком. Викиди в цих регіонах пов'язані переважно із сільським господарством, транспортом, дрібномасштабним виробництвом та споживанням енергії в житловому секторі.

Центральні регіони України характеризуються значним нереалізованим потенціалом підвищення енергоефективності, особливо у житловому секторі. Висока частина будівель, що потребують термомодернізації, говорять про системні проблеми енергоспоживання, сформовані ще в попередні періоди. Водночас модернізація будівель дозволяє досягти суттєвої економії енергії, що робить цей напрям одним із найбільш ефективних з точки зору витрат і результату. Поступове впровадження інтелектуальних систем обліку та оновлення теплопостачання створює передумови для підвищення керованості енергоспоживання. Загалом сектор домогосподарств залишається ключовою сферою для реалізації політики енергоефективності. Північні регіони України відіграють важливу роль у національному балансі поглинання вуглецю завдяки значній частині лісових екосистем. Високий рівень лісового покриття забезпечує стабільний природний поглинач CO₂, що є ключовим елементом політики кліматичної нейтральності. Водночас наявність деградованих та частково занедбаних земель формує додатковий потенціал для відновлення екосистем і розширення вуглецевих поглиначів. Високий рівень охоплення програмами лісовідновлення проти активної державної та регіональної політики у сфері сталого землекористування. У перспективі це дозволяє посилити роль регіону як природного «вуглецевого буфера» в національній кліматичній стратегії.

Визначено пріоритетні напрямки діяльності: розвиток циркулярних можливостей через стратегічні партнерства дозволяє спільне інвестування та розподіл ризиків, одночасно отримуючи доступ до спеціалізованої експертизи; активна участь у розробці політики та створенні галузевих стандартів формує сприятливі рамки, одночасно позиціонуючи організації для дотримання нормативних вимог та конкурентних переваг; програми культурної трансформації залучають співробітників та клієнтів до принципів циркулярної економіки, одночасно розвиваючи організаційні можливості для системного мислення та оптимізації життєвого циклу. Ці програми створюють стійкі конкурентні переваги

завдяки вбудованим циркулярним компетенціям. Циркулярна економіка в декарбонізації являє собою трансформаційний підхід, який фундаментально переосмислює те, як суспільства управляють ресурсами, прагнучи досягти кліматичних цілей.

Ключові слова: декарбонізація, циркулярна економіка, сталий розвиток, кліматично нейтральна економіка, цифровізація (діджиталізація), кліматичні зміни, зелений перехід, низьковуглецева економіка, трансформація, викиди, розширена відповідальність виробника, екологічне відновлення, логістика, фінансові виклики.

ABSTRACT

Babyar V. P. – **Decarbonization processes of the circular economy** – Qualification scientific work in the form of a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 051 “Economics”. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The dissertation examines the processes of formation and development of decarbonization, proving that it is a multifaceted concept that is central to understanding modern efforts to combat climate change, achieve sustainable development and transform modern industrial societies. It is shown that decarbonization is not just a technical term, it encompasses processes, systemic changes, regulatory goals and even broader civilizational transformations. Its meaning has changed over time, reflecting transitions from narrow industrial applications to complex socio-ecological, economic and technological contexts. This concept operates at several functional levels. From an environmental perspective, it aims to mitigate the effects of climate change and protect natural systems. From an economic perspective, it promotes innovation, investment in green technologies and the transition to sustainable markets. Technologically, it stimulates the development and deployment of renewable energy, energy-efficient solutions and carbon management systems. From a legal and institutional perspective, it requires governance structures, regulatory policies and joint international mechanisms to coordinate action at all levels. Together, these levels illustrate that decarbonization is inherently interdisciplinary and systemic.

It has been established that an ontological understanding of decarbonization highlights its fundamental nature - both a real process and a conceptual framework that links human activities with environmental outcomes. Recognizing this allows societies to plan more effectively, balancing technological progress, economic development, social justice and environmental governance.

It is proven that the analysis of macro-relationships in logarithmic form confirms the inverse relationship between GDP per capita and carbon intensity: economies with

higher income levels, as a rule, create a unit of added value with a lower carbon load. This pattern is empirically consistent with the interpretation of decarbonization as increasing resource efficiency and technological and organizational performance. At the same time, the presence of a zero-emissions target does not provide a clear delineation of subgroups in the available data. The distributions of indicators overlap significantly, especially among low- and middle-income countries, where the energy structure, technological level and starting conditions cause significant variability in results. This suggests that the declared target is more likely to correlate with institutional capacity and the structure of the economy within the available observations than to act as a self-sufficient determinant of current carbon efficiency.

It is analyzed that the generalization of empirical results indicates a high heterogeneity of decarbonization actors by type and level of governance. This complicates intergroup comparability and requires analytical distinction between territorial units (countries/regions/cities) and companies; for the latter, GDP and population indicators do not form a universal basis for comparison, and therefore direct comparisons may confuse scale effects and structural differences.

The prevalence of long-term zero-emission goals is maximum at the national and corporate levels and significantly lower at the city and regional levels. Such a gradient is consistent with the institutional logic of climate policy: formalization of goals, reporting and monitoring require administrative capacity, access to financing and policy coordination, which are on average more pronounced at the level of states and large corporations.

Carbon intensity as an indicator of carbon efficiency has a right-skewed distribution across all territorial groups; under such conditions, the median and interquartile range are more informative, as they are less sensitive to extreme observations, while the mean is sensitive to single high values. For cities, the typical (median) intensity level is lower, while for countries and regions, the median values are

close, indicating the similarity of the central characteristics of the distribution in the presence of differences in the prevalence of high intensity levels.

It is substantiated that the scenario emission trajectories by 2050 are characterized by a decreasing median dynamics and a wide interquartile range, reflecting differences in the initial emission levels, transformation rates and parameters of the declared goals. The division by the presence of a zero emissions goal is on average consistent with a more pronounced reduction in the subgroup with a goal, but the interquartile ranges overlap significantly. Therefore, it is appropriate to interpret the results obtained as a descriptive agreement of the available data and the general direction of changes, rather than as confirmation of the causal impact of the declarations themselves. The implementation of carbon border mechanisms in Europe has a major , especially for Asian exporters. This creates pressure for the harmonisation of carbon accounting systems and emissions reporting standards.

The future of global decarbonisation will be shaped by the interplay between technological innovation, geopolitical competition, financial restructuring and escalating climate risks. Both Europe and Asia are expected to remain central players in this process, but their trajectories will increasingly converge through global supply chains, carbon regulation mechanisms and international climate governance frameworks. At the same time, the transition will be made more difficult by rising systemic costs, resource constraints and uneven development dynamics.

The global challenge of climate change has transformed energy policy, economic strategies and environmental governance worldwide. The concept of decarbonisation as a systematic reduction of carbon dioxide emissions from energy production, industrial activities and transport has become a central strategy for achieving environmental sustainability and mitigating the effects of climate change. The transition to a low-carbon economy requires significant investment. According to international estimates, Ukraine will need approximately \$524 billion for reconstruction and recovery, with a significant portion earmarked for energy infrastructure and green transition projects. These

investments create opportunities for modernization, but also create fiscal and financial challenges.

Decarbonization and war-related disruptions have had a significant impact on heavy industry. For example, steel production has declined due to energy shortages and pressure to regulate carbon emissions, and companies have scaled back operations, potentially affecting thousands of jobs. However, the transition will create new job opportunities in renewable energy (solar, wind, bioenergy), energy efficiency, reconstruction, and green infrastructure sectors.

Within the framework of a circular economy, it is advisable to consider the effectiveness of decarbonization as a multidimensional category that encompasses not only the reduction of greenhouse gas emissions, but also the level of resource efficiency, innovation, structural modernization and integration of low-carbon technologies into production processes. This approach allows us to move from a narrow interpretation of decarbonization as an environmental process to understanding it as a comprehensive model of economic system transformation. In order to comprehensively assess the effectiveness of decarbonization in a circular economy, an author's integrated model, the Hybrid Mobility and Decarbonization Index or HMDI, has been proposed, which combines environmental, economic and structural parameters of transformation. A comparative analysis of the Hybrid Mobility and Decarbonization Index indicates significant differences in the models of low-carbon transformation between the European Union, Asian economies and Ukraine. These differences are formed under the influence of different levels of technological development, the structure of energy systems, institutional capacity, the degree of integration of the circular economy and the scale of digitalization.

A feature of the Ukrainian model is that decarbonization is closely combined with issues of energy security, post-war reconstruction and modernization of infrastructure. Unlike many Asian countries, where the main driver of decarbonization is industrial competitiveness, or the EU, where climate regulation dominates, in Ukraine the main

stimulus for the low-carbon transition is increasingly becoming the need for energy autonomy and rebuilding a sustainable economy.

The calculation results indicate the unevenness of the decarbonization transformation. The weakest component of the model remains the level of circularity of the economy (CE_n), since waste processing, secondary use of resources and industrial symbiosis systems are still insufficiently developed in Ukraine. This indicates that decarbonization in Ukraine is currently largely focused on the energy transition, while the circular component is at the stage of formation. The constructed dynamics of the HMDI also allowed for the formation of development scenarios until 2030. The baseline scenario assumes a gradual increase in the index due to the continued development of renewable energy, the digital economy and integration into the European climate space.

The decarbonization process in Ukraine cannot be understood as a homogeneous national transformation, since regional economic structures significantly determine both the intensity of emissions and the feasibility of mitigation strategies. The industrial regions of eastern and southeastern Ukraine are characterized by high levels of greenhouse gas emissions due to concentrated metallurgy, coal-based energy production and heavy manufacturing. In contrast, the central regions demonstrate a mixed structure, where agriculture, transport and moderate industrial activities contribute to emissions, while the western regions generally demonstrate lower carbon intensity and more potential for the development of renewable energy, in particular in biomass, solar energy and small hydropower systems.

In the context of decarbonization, a just transition includes several key dimensions such as labor market transformation, including retraining and reskilling of coal and heavy industry workers, regional economic diversification aimed at reducing dependence on mono-sector economies, social protection mechanisms that ensure income stability during structural economic shifts, community participation that allows local populations to participate in decision-making processes regarding energy and industrial transformation.

The decarbonization scenarios of Eastern Ukraine demonstrate that the most balanced in terms of cost and effectiveness are measures to increase energy efficiency and integrate renewable energy sources. Electrification of industry has significant emission reduction potential, but requires significant investments in infrastructure modernization. Hydrogen metallurgy provides one of the highest levels of emission reduction results, but its implementation is limited by high cost and technological complexity. Full system modernization allows to achieve the maximum decarbonization effect, but is capital-intensive and requires long-term strategic planning. In general, an effective transition requires a combination of several scenarios.

The central regions of Ukraine, including Poltava, Cherkasy, Vinnytsia, Kirovohrad and Kyiv regions (excluding the capital), are characterized by a more balanced economic structure with a strong agricultural base and moderate industrial development. Emissions in these regions are mainly associated with agriculture, transport, small-scale production and energy consumption in the residential sector.

The central regions of Ukraine are characterized by significant unrealized potential for increasing energy efficiency, especially in the residential sector. The high share of buildings requiring thermal modernization indicates systemic energy consumption problems that have been formed in previous periods. At the same time, building modernization allows for significant energy savings, which makes this direction one of the most effective in terms of costs and results. The gradual introduction of intelligent metering systems and the renewal of heat supply creates the prerequisites for increasing the manageability of energy consumption. In general, the household sector remains a key area for implementing energy efficiency policies. The northern regions of Ukraine play an important role in the national carbon absorption balance due to a significant part of forest ecosystems. A high level of forest cover provides a stable natural CO₂ sink, which is a key element of climate neutrality policy. At the same time, the presence of degraded and partially abandoned lands creates additional potential for ecosystem restoration and expansion of carbon sinks. A high level of coverage by

reforestation programs against an active state and regional policy in the field of sustainable land use. In the future, this allows strengthening the role of the region as a natural “carbon buffer” in the national climate strategy.

Priority areas of action have been identified: developing circular capabilities through strategic partnerships allows for co-investment and risk sharing while gaining access to specialized expertise; active participation in policy development and industry standard setting creates an enabling framework while positioning organizations for regulatory compliance and competitive advantage; cultural transformation programs engage employees and customers in circular economy principles while developing organizational capabilities for systems thinking and life cycle optimization. These programs create sustainable competitive advantages through embedded circular competencies. The circular economy in decarbonization is a transformative approach that fundamentally rethinks how societies manage resources in pursuit of climate goals.

Keywords: decarbonization, circular economy, sustainable development, climate-neutral economy, digitalization, climate change, green transition, low-carbon economy, transformation, emissions, extended producer responsibility, ecological recovery, logistics, financial challenges.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових
видань України:

1. Драпак Т.І., Баб'яр В.П. Циркулярна економіка: можливості та бар'єри. *Збірник наукових праць «Цифрова економіка та економічна безпека», № 1(10), 2024 рік. С. 67-73. URL: <https://doi.org/10.32782/dees.10-12> (0,8 д.а.).*

2. Драпак Т.І., Корнієнко Д. Б., Баб'яр В.П. Трансформація економічних, фінансових та продуктивних систем пришвидшує перехід до сталого розвитку *Економічний науково-практичний журнал Сталий розвиток економіки, № 4 (51), 2024 С. 199-205. URL: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-51-29> (0,8 д.а.).*

3. Баб'яр В.П., Зварич І. Я., Ванкевич І. С. Фінансові виклики та загрози логістики циркулярної економіки. Науковий журнал Західноукраїнського національного університету «Світ фінансів». Випуск 1, 2024 рік. С. 111 – 130. URL: <http://sf.wunu.edu.ua/index.php/sf/article/view/1676/1687>

4. Баб'яр В.П., Кельнер О., Бочаров В., Тимофійчук Ю. Сучасні аспекти корпоративної соціальної відповідальності та їх вплив на глобальний економічний розвиток. *Інклюзивна економіка, № 4 (06), 2024 С. 5 – 11. URL: https://doi.org/10.32782/inclusive_economics.6-1 (0,67 д.а.).*

5. Баб'яр В.П., Зварич І. Я., Гладкий Я. Екологічне відновлення України шляхом публічної дипломатії. *Інвестиції: практика та досвід " № 5, березень 2026 р. С.104-114. (0,45 д.а.). URL: 10.32702/2306-6814.2026.5.104*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Драпак Т.І., Бродовська О.Г., Корнієнко Д.Б., Баб'яр В.П. Побудова кращого майбутнього за допомогою стійких інвестицій: висновки нещодавніх досліджень. Матеріали мультидисциплінарного наукового часопису «Нотатки сучасної науки», № 14, 2024. С. 12-13. (0,1 д.а.).

7. Баб'яр В.П. Сучасний стан декарбонізації в Німеччині. Збірник тез доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Міжнародна економіка в умовах кліматичних змін: глобальні виклики» від 26 квітня 2024 р. с. 150-152. (0,1 д.а.).

ЗМІСТ

ВСТУП		20
РОЗДІЛ 1	КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ГЛОБАЛЬНОЇ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ	27
1.1.	Онтологія концепту «декарбонізації»	27
1.2.	Еволюція наукових досліджень декарбонізації, їх історичний розвиток та ключові наукові підходи	55
1.3.	Інституційно-економічні механізми стимулювання декарбонізації в умовах циркулярної економіки	67
	Висновки до 1 розділу	79
РОЗДІЛ 2	АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ	81
2.1.	Статистичне оцінювання показників декарбонізації в умовах глобальної циркулярної економіки	81
2.2.	Розвиток декарбонізації в Європі та Азії	100
2.3.	Розвиток процесу декарбонізації в Україні	145
	Висновки до 2 розділу	166
РОЗДІЛ 3	ШЛЯХИ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ГЛОБАЛЬНОЇ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ	169
3.1.	Оцінка ефективності декарбонізації в умовах циркулярної економіки	169
3.2.	Регіональні особливості впровадження декарбонізації в Україні	180
3.3.	Стратегічні перспективи декарбонізації глобальної циркулярної економіки в умовах цифрової трансформації та кліматичних викликів	201
	Висновки до 3 розділу	226
ВИСНОВКИ.....		230
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		232
ДОДАТКИ.....		252

ВСТУП

Актуальність дослідження. Фундаментальною передумовою циркулярної економіки є відокремлення економічного процвітання від споживання обмежених ресурсів. Це відокремлення є не просто теоретичним ідеалом, а функціональною необхідністю для досягнення цілей, встановлених Паризькою угодою. Хоча глобальний перехід до відновлюваних джерел енергії та поступова відмова від викопного палива, за оцінками, вирішують проблему приблизно 55% світових викидів парникових газів, решта 45% нерозривно пов'язані зі способами, якими світ виробляє, споживає та управляє матеріалами та продуктами.

Декарбонізація важких, енергоємних галузей промисловості – сталі, алюмінію, цементу та пластмас – є «передовою» циркулярного переходу. На ці галузі наразі припадає майже 15% загальних викидів парникових газів у таких регіонах, як Європейський Союз. Традиційні шляхи декарбонізації в цих галузях промисловості часто спираються на капіталомісткі технології.

Для того, щоб світ досяг сценарію нульових викидів до 2050 року, темпи покращення енергоємності повинні подвоїтися приблизно до 4% на рік. Процеси циркулярної економіки, такі як ремануфактуринг, високоякісна переробка та заміщення матеріалів, пропонують шлях до подолання цього розриву шляхом різкого зменшення енергії, необхідної для видобутку та переробки первинних матеріалів.

Концептуальні засади досліджень декарбонізації стали роботи дослідників енергетичної політики Аморі Ловінса, Чарльза Девіда Кілінга, Вільяма Д. Нордхауса, Френка В. Гілза, Стівена Пакали та Роберта Соколова, Ніколаса Стерна, Джина Гроссмана, Алана Крюгера, Артура П. Дж. Мола, Герта Спааргарена, Френка В. Гілза, А. Пігу, Тіма Джексона, Джейсона Хікеля, Джеффри М. Ходжсона.

Власне цією тематикою займалися такі українські науковці як Зварич І.Я., Куриляк В.Є., Борисяк О.В., Пуцентейло П.Р., Яценко О.М., Орехова Т.В.

Попри вагомий значний науковий доробок вищезгаданих науковців, економічні закономірності декарбонізації з позиції циркулярної економіки залишаються недостатньо опрацьованими у теоретико-методичному та прикладному плані. Відтак потреба в обґрунтуванні теоретичних і методологічних положень стосовно дослідження декарбонізації циркулярної економіки, у тому числі й для України, зумовила вибір теми дисертаційної роботи, її мету та завдання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт Західноукраїнського національного університету у межах науково-дослідних тем, зокрема, у 2025 році – у підготовці фундаментального держбюджетного дослідження «Концепція відбудови та зеленої реконструкції України» (державний реєстраційний 0124U00003). Також у 2023-2026 роках Баб'яр В.П. брав участь у НДР, яка виконувалася професорсько-викладацьким персоналом, докторантами, аспірантами та здобувачами наукового ступеня в межах основного робочого часу кафедри міжнародної економіки ЗУНУ «Геоенормічні та цивілізаційні виклики розвитку глобальної економіки» (0121U111077), зокрема у підготовці розділу «Геоенормічні та цивілізаційні виклики розвитку глобальної економіки»; у 2026 році – «Циркулярна економіка як драйвер екологічної безпеки держави» (0125U004247), розділ «Процеси декарбонізації глобальної циркулярної економіки».

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є обґрунтування теоретико-методичних положень процесів декарбонізації глобальної циркулярної економіки та напрацювання шляхів імплементації декарбонізації глобальної циркулярної економіки в Україні. Досягнення означеної мети зумовило постановку і вирішення таких завдань:

- розкрити онтологічні особливості концепту «декарбонізації»;
- виокремити еволюційні періоди наукових досліджень декарбонізації, їх історичний розвиток та ключові наукові підходи;

- окреслити інституційно-економічні механізми стимулювання декарбонізації в умовах циркулярної економіки;
- здійснити статистичне оцінювання показників декарбонізації в умовах глобальної циркулярної економіки;
- проаналізувати розвиток декарбонізації в Європі та Азії;
- провести аналіз розвитку процесу декарбонізації в Україні;
- здійснити оцінку ефективності декарбонізації в умовах циркулярної економіки;
- виявити регіональні особливості впровадження декарбонізації в Україні;
- напрацювати стратегічні перспективи декарбонізації глобальної циркулярної економіки в умовах цифрової трансформації та кліматичних викликів.

Об’єктом дослідження є процеси становлення та розвитку процесів декарбонізації глобальної циркулярної економіки.

Предметом дослідження є теоретико-методичні та прикладні засади формування концепту декарбонізації глобальної циркулярної економіки.

Методи дослідження. У написанні дисертації використовувались теоретичні та загальнонаукові методи. Ці методи формують основу огляду літератури та концептуальної бази. Зокрема, системний підхід використовується для аналізу декарбонізації глобальної циркулярної економіки. Історичний та логічний метод дозволяє простежити еволюцію наукових досліджень декарбонізації, їх історичний розвиток та ключові наукові підходи. Дедукція від абстрактного до конкретного дозволила розробити Інституційно-економічні механізми стимулювання декарбонізації в умовах циркулярної економіки. Статистичні методи застосовуються для систематизації, узагальнення та кількісного опису сукупності спостережень, а також для встановлення наряду та сили статистичних зв’язків між показниками.

Інформаційно-фактологічною базою дисертаційної роботи є матеріали Організації економічного співробітництва та розвитку, Конференції ООН з торгівлі та розвитку, Євростату, Всесвітнього економічного форуму, матеріали аналітичних оглядів та періодичних видань, монографії вітчизняних і зарубіжних учених тощо.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вирішенні важливої науково-практичної проблеми – теоретичне обґрунтування положень положень процесів декарбонізації глобальної циркулярної економіки та напрацювання шляхів імплементації декарбонізації глобальної циркулярної економіки в Україні.

Основні положення дисертаційної роботи, що визначають її наукову новизну, полягають у такому:

вперше:

- доведено високу гетерогенність суб'єктів декарбонізації за типом та рівнем управління, що ускладнює міжгрупову порівнюваність і вимагає аналітичного розмежування територіальних одиниць (країни/регіони/міста) та компаній; для останніх показники ВВП і чисельності населення не формують універсальної бази зіставлення, а отже прями порівняння можуть змішувати ефекти масштабу та структурні відмінності. Відповідно розповсюдженість довгострокових цілей нульових викидів є максимальною на національному та корпоративному рівнях і суттєво нижчою на рівні міст і регіонів. Такий градієнт узгоджується з інституційною логікою кліматичної політики. Доведено, що вуглецева інтенсивність як показник вуглецевої ефективності має правосторонньо асиметричний розподіл у всіх територіальних групах.

удосконалено:

- дослідження еволюції наукових вчень декарбонізації в контексті їх історичного розвитку, зокрема, актуалізовано ранні витoki досліджень декарбонізації, період інституалізації досліджень, їх теоритезації, що дозволило окреслити теорії декарбонізації, починаючи від екологічної кривої Кузнеця до теорії справедливого переходу;

- методика дослідження за рахунок авторської інтегрованої моделі – Індекс гібридної мобільності та декарбонізації «Hybrid Mobility and Decarbonization Index» чи HMDI, яка поєднує екологічні, економічні та структурні параметри трансформації. Порівняльний аналіз індексу гібридної мобільності та декарбонізації свідчить про суттєві відмінності у моделях низьковуглецевої трансформації між Європейським Союзом, азійськими економіками та Україною. Ці відмінності формуються під впливом різного рівня технологічного розвитку, структури енергетичних систем, інституційної спроможності, ступеня інтеграції циркулярної економіки та масштабів цифровізації.;

- система обмежень, що стримують реалізацію декарбонізаційних стратегій у глобальному економічному просторі, структуровані за економічним, технологічним, інституційним та соціально-політичним вимірами. До економічних бар'єрів віднесено високі інвестиційні потреби та значний фінансовий тиск, пов'язаний із трансформацією енергетичних і виробничих систем, що особливо актуально для капіталомістких галузей. Технологічний блок відображає наявність «вузьких місць», пов'язаних із недостатньою зрілістю або масштабованістю інноваційних рішень, зокрема у сфері водневої енергетики, накопичення енергії та уловлювання вуглецю.

набуло подальшого розвитку:

- інституційний вимір, який представлений складністю регуляторного середовища та фрагментацією управлінських підходів, що ускладнює координацію політик на національному та міжнародному рівнях. Соціально-політичний аспект охоплює фактори суспільного опору та політичних ризиків, які виникають у процесі структурних змін, зокрема у регіонах, залежних від традиційних галузей. Сукупність цих бар'єрів формує багаторівневу систему стримувальних чинників, що потребує комплексного підходу до управління трансформаційними процесами, поєднання фінансових, технологічних та інституційних інструментів, а також

узгодження інтересів ключових стейкхолдерів у межах переходу до низьковуглецевої та циркулярної моделі розвитку;

- концепція циркулярної економіки в контексті декарбонізації, що являє собою трансформаційний підхід, який фундаментально переосмислює те, як суспільства управляють ресурсами, прагнучи досягти кліматичних цілей. На відміну від традиційних лінійних моделей, які дотримуються схеми «взяти-виготовити-утилізувати», циркулярні системи створюють замкнені цикли, де матеріали безперервно циклічно переходять через продуктивне використання, усуваючи відходи та водночас різко зменшуючи викиди парникових газів.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність дисертації полягає в тому, що теоретичні та методичні основи, прикладні рекомендації шляхи імплементації декарбонізації глобальної циркулярної економіки, оцінка ефективності декарбонізації в умовах циркулярної економіки, регіональні особливості впровадження декарбонізації в Україні можуть бути використані центральними і регіональними органами державної влади та місцевого самоврядування для розробки і реалізації «дорожньої карти» державної економічної та екологічної політики та визначення стратегічних пріоритетів соціально-економічного й розвитку України. Отримані результати апробовані і доведені до рівня конкретних науково-методичних і практичних рекомендацій.

Обґрунтовані науково-практичні рекомендації щодо впровадження елементи системи індикаторів моніторингу та методичні рекомендації у розробку плану дій товариства з уркулярної економіки, процес формування плану імпорту хімічних продуктів , проведення діяльності товариства у відповідність екологічному законодавству враховані у роботі товариства з обмеженою відповідальністю «К+С Україна» (довідка № 05/11-2025/1 від 05.11.2025 р.), при реалізації багатьох програмних проектів у товаристві з обмеженою відповідальністю «ТЕХНО – БУД – ЦЕНТР»» (довідка № 535 від 10.11.2025 р.).

Особистий внесок здобувача. Наукові результати та положення наукової новизни, що наведені у дисертації і виносяться на захист, отримані автором особисто. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в роботі використано лише ті ідеї і положення, які є результатом власних розробок автора.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи пройшли апробацію на міжнародних наукових та науково-практичних конференціях, зокрема: Мультидисциплінарний науковий часопис «Нотатки сучасної науки», III Міжнародна науково-практична конференція Міжнародна економіка в умовах кліматичних змін: глобальні виклики (26 квітня, 2024 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 7 наукових праць загальним обсягом 5,25 д. а, з яких автору належить 2 д. а, у тому числі: 5 статей у наукових фахових виданнях України, 2 публікації за матеріалами міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 266 сторінок, з них 227 сторінок основного тексту. Дисертація містить 57 таблиць, 33 рисунки та 4 додатки на 13 сторінках. Список використаних джерел налічує 143 найменувань на 20 сторінках.

Декларація про використання ШІ.

Під час підготовки роботи автор використовував Gemini 3 Pro та OpenAI GPT-5 для пошуку та первинного опрацювання літературних джерел, оформлення ілюстрації, а також виявлення та виправлення граматичних, орфографічних та стилістичних помилок. Після застосування цих інструментів автор провів ретельний перегляд і вніс необхідні зміни, беручи на себе повну відповідальність за остаточний зміст дисертаційної роботи.

1 РОЗДІЛ

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ГЛОБАЛЬНОЇ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

1.1. Онтологія концепту «декарбонізації».

Прискорення глобальних проблем зміни клімату, деградації навколишнього середовища та нестійких економічних практик зробили концепцію декарбонізації центральною в сучасному науковому, політичному та соціально-економічному дискурсі. Спочатку це був технічний термін, що описує скорочення вмісту вуглецю в промислових процесах, але декарбонізація перетворилася на багатовимірну концепцію, що охоплює екологічні, економічні, технологічні, інституційні та соціально-культурні виміри. Її значення виходить за рамки простого скорочення викидів, представляючи собою системну трансформацію у способі, яким суспільство виробляє, споживає та управляє ресурсами.

Розуміння онтології декарбонізації є важливим для уточнення як концептуальних основ терміна, так і його практичних наслідків для політики та суспільства. У контексті декарбонізації онтологічний аналіз дозволяє дослідникам досліджувати це явище не лише як сукупність процесів або політик, але й як структурну та системну характеристику сучасної цивілізації. Ця перспектива дає уявлення про фундаментальні механізми, за допомогою яких декарбонізація формує екологічні результати, економічні структури, технологічний розвиток та соціальну поведінку.

**Алгоритм
дослідження
онтології
слова декарбо
нізація**

1. Термін «декарбонізація»
 2. Етимологія та семантичне формування
 3. Декарбонізація:
 - 3.1. Декарбонізація як процес
 - 3.2. Декарбонізація як системна трансформація
 - 3.3. Декарбонізація як нормативний ідеал
 - 3.4. Декарбонізація як цивілізаційний зсув
 4. Інституційний та політичний контекст
 5. Функціональні рівні концепції
 - 5.1. Екологічний рівень
 - 5.2. Економічний рівень
 - 5.3. Технологічний рівень
 - 5.4. Правовий та інституційний рівень
 6. Семантичне та дискурсивне розширення
 7. Онтологічна типологія декарбонізації
 8. Онтологічна інтерпретація
 - 8.1. Декарбонізація як процес
 - 8.2. Декарбонізація як структурна трансформація
 9. Онтологія декарбонізації
- Висновок

Рис. 1.1. Алгоритм дослідження онтології слова декарбонізація

Джерело: складено автором

Семантична еволюція декарбонізації відображає її зростаючу складність та міждисциплінарність. Від раннього технічного використання в хімії та металургії, цей термін поширився на дослідження енергетики, кліматичну політику, економіку та дослідження сталого розвитку. Сьогодні він функціонує як описовий термін для низьковуглецевих процесів, так і нормативна концепція, що керує глобальними стратегіями сталого розвитку. Це семантичне розширення демонструє здатність наукової мови адаптуватися до нових викликів, інтегруючи різноманітні перспективи з екологічної науки, економіки, технологій та управління.

Аналіз декарбонізації на функціональному та онтологічному рівнях забезпечує всебічне розуміння її системних наслідків. На екологічному рівні вона пом'якшує зміни клімату та зберігає екологічну стабільність. Економічно вона стимулює інновації, зелені інвестиції та трансформацію ринкових систем. Технологічно вона сприяє розвитку та впровадженню відновлюваної енергії, енергоефективних рішень та систем управління вуглецем. Юридично та інституційно вона спирається на рамки управління, нормативні акти та міжнародну співпрацю для ефективною координації дій. З онтологічної точки зору, декарбонізація є одночасно процесом, структурною трансформацією, нормативним ідеалом та цивілізаційним зрушенням, що ілюструє її глибоку інтеграцію в численні шари суспільства та екологічні системи.

Формулювання цього дослідницького питання відображає зростаючу важливість концепції декарбонізації в сучасному академічному, політичному та технологічному дискурсі. У сучасних наукових дослідженнях термін «декарбонізація» використовується для опису складного процесу, спрямованого на скорочення або усунення викидів вуглекислого газу (CO_2) з економічних, промислових та енергетичних систем [1]. Однак, окрім свого технічного значення, термінологія декарбонізації розвинулася в багатовимірну концепцію, яка охоплює екологічні, економічні, технологічні та інституційні трансформації [3, С. 45–47].

З термінологічної точки зору, слово «декарбонізація» походить від поєднання латинського префікса de-, що означає видалення або скорочення, та кореня carbon, що стосується речовин на основі вуглецю та викидів вуглецю, зокрема вуглекислого газу, що виділяється внаслідок спалювання викопного палива. Суфікс -ization вказує на процес або трансформацію. Отже, у своєму буквальному лінгвістичному тлумаченні декарбонізація означає процес зменшення або усунення вмісту вуглецю чи викидів вуглецю з системи [2]. Лінгвістично та концептуально цей термін являє собою орієнтовану на трансформацію концепцію, яка описує поступовий перехід до низьковуглецевих або вуглецево-нейтральних систем [4, С. 56–57].

У науковій та політичній літературі термінологія декарбонізації поступово розширилася за межі свого первісного технічного використання в хімії та промисловій металургії, де вона спочатку стосувалась видалення вуглецю з металевих сплавів або промислових матеріалів. Наприкінці ХХ та на початку ХХІ століття ця концепція почала набувати ширшого екологічного та соціально-економічного значення, оскільки глобальна стурбованість щодо зміни клімату посилювалася [3, С. 21–24]. Сьогодні декарбонізація широко використовується для опису системних трансформацій у виробництві енергії, транспортуванні, промисловості та моделях споживання, спрямованих на зменшення викидів парникових газів та стабілізацію глобального клімату [4, С. 89–91].

У літературі з екологічної науки та управління кліматом декарбонізація часто асоціюється зі стратегіями, спрямованими на зменшення залежності від викопного палива та сприяння переходу на відновлювані та низьковуглецеві джерела енергії, такі як сонячна, вітрова, гідроелектрична та ядерна енергія. Ці трансформації є важливими компонентами глобальних стратегій пом'якшення зміни клімату, спрямованих на обмеження підвищення глобальної температури та досягнення довгострокових цілей сталого розвитку [4, С. 112–115]. У цьому контексті концепція функціонує не лише як описовий термін, але й як нормативна та

стратегічна основа, що керує міжнародною кліматичною політикою та управлінням навколишнім середовищем [5, С. 56–57].

Концептуалізація декарбонізації також тісно пов'язана з ідеєю енергетичного переходу, яка стосується структурної трансформації енергетичних систем від вуглецевмістких джерел до відновлюваних та стійких альтернатив. У цих рамках декарбонізація включає технологічні інновації, підвищення енергоефективності, електрифікацію промислового та транспортного секторів, а також розвиток технологій уловлювання та зберігання вуглецю [3, С. 98–101]. Ці процеси разом сприяють скороченню викидів парникових газів та трансформації економічних систем до кліматичної нейтральності [6].

У політичному дискурсі термінологія декарбонізації тісно пов'язана з міжнародними кліматичними угодами, національними кліматичними стратегіями та інституційними рамками, спрямованими на боротьбу з глобальним потеплінням. Багато урядів та міжнародних організацій використовують цю концепцію як центральний принцип, що керує екологічною політикою та регуляторними механізмами, спрямованими на скорочення викидів, просування чистих технологій та стимулювання сталого економічного розвитку [5, С. 72–74]. Зростаюча інституціоналізація концепції демонструє її перетворення з суто наукового терміна на ключову категорію глобального екологічного управління [4, С. 133–136].

Крім того, термінологія декарбонізації набула важливих соціально-економічних наслідків. Перехід до низьковуглецевих систем вимагає структурних змін у промисловому виробництві, ринках праці та моделях економічного розвитку. Як наслідок, декарбонізацію часто обговорюють у зв'язку з концепціями зеленої економіки, сталого розвитку та кліматичної справедливості [7, С. 41–44]. Ці дискусії підкреслюють, що перехід до низьковуглецевих систем повинен не лише зменшити вплив на навколишнє середовище, але й забезпечити соціальну справедливість, економічну стійкість та доступність технологій.

Коли ми говоримо про декарбонізацію, ми насправді маємо на увазі три окремі рівні існування (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Основні концептуальні рівні та визначення декарбонізації

Рівень	Пояснення	Приклади / Дії
Фізичний («Що»)	Матеріальна реальність переходу від високовуглецевої до низьковуглецевої економіки	Електрифікація транспорту; перехід на сонячну, вітрову та ядерну енергетику; секвестрація вуглецю через ліси або CCS
Економічний («Як»)	Переосмислення цінності вуглецю як економічного ресурсу; зменшення «зовнішніх ефектів»	Ціноутворення на вуглець; впровадження циркулярної економіки; стимулювання інновацій у зелених технологіях
Соціально-політичний («Чому»)	Етичні та соціальні аспекти декарбонізації; зміна свідомості людей і політик	Справедливий перехід для працівників та країн; зміна мислення від «панування над природою» до управління в межах планетарних систем

Джерело: складено на основі [9,10,11]

Ще один важливий аспект термінології декарбонізації стосується її онтологічних та системних вимірів. У сучасних міждисциплінарних дослідженнях декарбонізація все частіше інтерпретується як системна трансформація, що впливає на взаємопов'язані технологічні, екологічні, економічні та соціальні системи. Ця перспектива розглядає декарбонізацію не просто як технічний процес скорочення викидів, а як комплексну зміну парадигми в організації сучасної промислової цивілізації [6, С. 63–66]. Такі інтерпретації підкреслюють складний та багатошаровий характер концепції, яка діє одночасно на місцевому, національному та глобальному рівнях.

Таким чином, термінологія декарбонізації являє собою динамічну та еволюціонуючу концепцію, яка відображає ширші трансформації в екологічній свідомості, наукових знаннях та структурах глобального управління. Її семантичне розширення демонструє, як наукова термінологія може перетворитися на ключову

концептуальну основу, що формує політику, технологічні інновації та розвиток суспільства. Тому розуміння термінологічних основ та концептуальної еволюції декарбонізації є важливим для аналізу сучасної кліматичної політики, стратегій енергетичної трансформації та ініціатив сталого розвитку [1; 3; 5].

Вивчення етимології та семантичного формування терміна «декарбонізація» є важливим елементом термінологічного аналізу в сучасних екологічних та кліматичних дослідженнях. У сучасному академічному дискурсі термін «декарбонізація» широко використовується для позначення процесів, пов'язаних зі скороченням або ліквідацією викидів вуглекислого газу в економічних та технологічних системах [1]. Однак семантична структура терміна відображає складне лінгвістичне утворення, яке поєднує елементи класичних мовних коренів із сучасною науковою термінологією [2].

З етимологічної точки зору слово «декарбонізація» походить від поєднання кількох морфологічних елементів, які разом утворюють його семантичне значення.

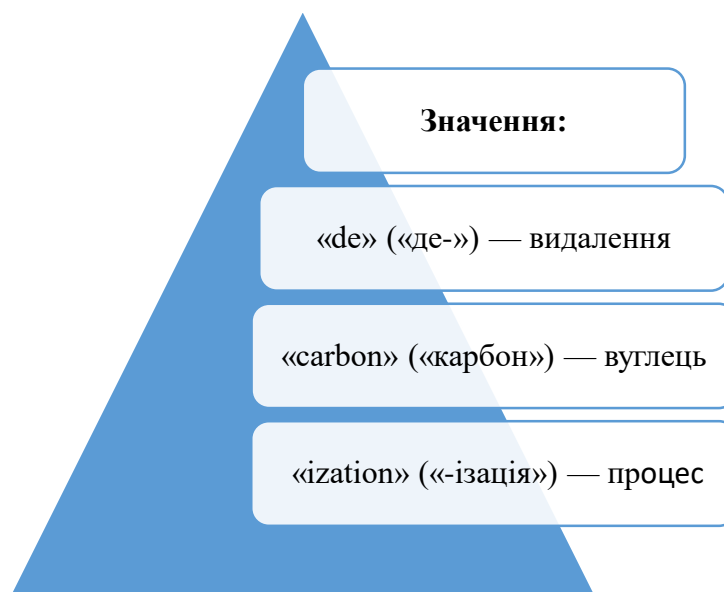


Рис. 1.2. Етимологія «декарбонізації»

Джерело: складено автором

Префікс «de», що походить від латинської мови, означає видалення, зменшення або зворотне усунення процесу. Цей префікс широко використовується

в науково-технічній термінології для опису процесів, що включають ліквідацію або зменшення певної речовини чи властивості [2]. Корінь «carbon» походить від латинського слова *carbo*, що означає вугілля або деревне вугілля, і в сучасній науковій термінології він стосується хімічного елемента вуглецю та його сполук, зокрема викидів вуглекислого газу, що утворюються внаслідок спалювання викопного палива [1]. Суфікс «ization», який бере свій початок у грецькій та латинській лінгвістичних традиціях, позначає процес, перетворення або акт перетворення чогось у певний стан. У науковій термінології цей суфікс зазвичай використовується для опису динамічних процесів або систематичних змін, що відбуваються у фізичних, хімічних або соціальних системах [3, с. 45–47]. Отже, морфологічний склад слова *decarbonisation* буквально означає процес видалення вуглецю або зменшення вмісту вуглецю в системі.

У своєму найдавнішому використанні термін *decarbonisation* з'явився в галузях хімії та металургії, де він стосувався процесу видалення вуглецю з металевих сплавів або промислових матеріалів під час виробничих процесів. У цьому технічному контексті *decarbonisation* описував хімічну реакцію або технологічну операцію, спрямовану на зміну складу металів, зокрема сталі, шляхом зменшення вмісту вуглецю в них [4, с. 56–57]. Це початкове значення демонструє, що концепція спочатку функціонувала у вузьких промислових та наукових рамках.

Однак, наприкінці ХХ століття семантичний обсяг терміна почав розширюватися, оскільки екологічні проблеми та дослідження клімату активізувалися. Вчені та політики все частіше використовували термін «декарбонізація» для опису скорочення викидів вуглекислого газу з енергетичних систем та промислового виробництва [3, с. 78–80]. Це семантичне розширення відображало зростаючу глобальну обізнаність про зміну клімату та необхідність трансформації енергетичних систем, які сильно залежать від викопного палива.

У сучасному науковому дискурсі семантичне формування терміна «декарбонізація» відображає перехід від суто технічної концепції до ширшої

міждисциплінарної категорії, що охоплює екологічну, політику, економіку та технологічні інновації. Тепер термін стосується трансформації енергетичних, промислових та транспортних систем з метою мінімізації викидів парникових газів та переходу до низьковуглецевих або вуглецево-нейтральних шляхів розвитку [5, с. 33–36]. Як результат, концепція функціонує як описовий науковий термін, так і як нормативна основа, що керує кліматичними стратегіями та екологічним управлінням.

Семантична еволюція терміна тісно пов'язана з появою глобального кліматичного управління та міжнародних екологічних угод. Міжнародні інституції та політичні рамки все частіше використовують концепцію декарбонізації для опису довгострокових стратегій, спрямованих на досягнення кліматичної нейтральності та скорочення глобальних викидів парникових газів [6]. Ці стратегії часто передбачають розвиток технологій відновлюваної енергії, підвищення енергоефективності, електрифікацію транспорту та впровадження систем уловлювання та зберігання вуглецю.

Ще один важливий вимір семантичного формування терміна стосується його інтеграції в ширшу концептуальну рамку сталого розвитку. У сучасній академічній літературі декарбонізація часто асоціюється з такими поняттями, як енергетичний перехід, зелена економіка та кліматична нейтральність. Ці взаємопов'язані концепції підкреслюють системний характер трансформації, необхідної для скорочення глобальних викидів вуглецю при збереженні економічного зростання та соціальної стабільності [7, с. 41–44].

Крім того, семантичне розширення терміна демонструє, як наукова термінологія розвивається у відповідь на нові екологічні виклики та технологічні розробки. Те, що спочатку функціонувало як технічний термін, що описує хімічний або металургійний процес, поступово перетворилося на центральне поняття глобального кліматичного дискурсу. Ця трансформація ілюструє динамічний характер наукової мови та роль термінології у формуванні концептуальних рамок,

що використовуються в політиці, дослідженнях та міжнародному співробітництві [4, с. 89–91].

Таким чином, етимологія та семантичне формування терміна «декарбонізація» свідчать про складний процес лінгвістичного та концептуального розвитку. Термін відображає як його історичне походження в промисловій науці, так і його сучасну роль як ключового поняття в екологічному управлінні та стратегіях сталого розвитку. Розуміння етимологічних основ та семантичної еволюції терміна є важливим для аналізу сучасного кліматичного дискурсу та концептуальних структур, що лежать в основі глобальної політики декарбонізації [1; 3; 6].

Концепція декарбонізації займає центральне місце в сучасних дискусіях щодо пом'якшення наслідків зміни клімату, сталого розвитку та трансформації глобальних економічних систем. У сучасній академічній літературі декарбонізація розуміється не як окремий технічний процес, а як складне та багатовимірне явище, що охоплює технологічні, економічні, інституційні та соціально-культурні трансформації [1]. Ця концептуальна складність вимагає систематичного аналізу декарбонізації з кількох аналітичних точок зору, включаючи її інтерпретацію як процесу, як системної трансформації, як нормативного ідеалу та як ширшого цивілізаційного зрушення.

З науково-технологічної точки зору, декарбонізацію можна спочатку розуміти як процес, що передбачає поступове скорочення або ліквідацію викидів вуглекислого газу з економічних та промислових систем. У цьому сенсі концепція стосується комплексу практичних заходів, спрямованих на зниження вуглецемісткості виробництва енергії, промислової діяльності та транспортних систем [2].

Процес декарбонізації зазвичай включає перехід від викопного палива, такого як вугілля, нафта та природний газ, до відновлюваних джерел енергії, включаючи сонячну, вітрову, гідроелектричну та інші низьковуглецеві технології. Це також

передбачає підвищення енергоефективності, електрифікацію промислових і транспортних систем, а також розвиток інноваційних технологій, таких як уловлювання та зберігання вуглецю (CCS) [3, с. 42–45].

У цих рамках декарбонізація являє собою поступову та вимірювану трансформацію енергетичних систем та виробничих процесів, спрямовану на скорочення викидів парникових газів та пом'якшення наслідків зміни клімату. У міжнародних кліматичних звітах підкреслюється, що глибока декарбонізація енергетичних систем є важливою для обмеження підвищення глобальної температури та досягнення довгострокових цілей стабілізації клімату [4, С. 56–57].

Окрім технічного тлумачення, декарбонізацію також можна розглядати як системну трансформацію, що впливає на структурну організацію сучасних економік та суспільств. Ця перспектива підкреслює, що скорочення викидів вуглецю вимагає не лише технологічних інновацій, а й значних інституційних, економічних та соціальних змін [5].

Системна декарбонізація передбачає реструктуризацію цілих секторів економіки, включаючи виробництво енергії, транспорт, виробництво, сільське господарство та міську інфраструктуру. Ці трансформації вимагають скоординованих політичних заходів, технологічних інновацій, фінансових інвестицій та змін у поведінці споживачів. В результаті декарбонізація стає комплексним процесом соціально-економічної реструктуризації, а не суто технічним коригуванням [6, С. 73–75].

Дослідники все частіше наголошують на тому, що системна декарбонізація вимагає інтегрованих стратегій, що поєднують технологічний прогрес з регуляторними рамками, ринковими стимулами та міжнародною співпрацею. Такі стратегії спрямовані на створення стійких економічних систем, здатних підтримувати продуктивність та соціальну стабільність, одночасно значно зменшуючи вплив на навколишнє середовище [3, С. 88–91].

Окрім своїх технологічних та системних вимірів, декарбонізація також функціонує як нормативний ідеал у сучасному екологічному дискурсі. У цьому контексті ця концепція являє собою бажану мету або керівний принцип, що формує міжнародну кліматичну політику та стратегії сталого розвитку [7].

Міжнародні організації та уряди часто використовують концепцію декарбонізації як нормативну основу, що керує екологічним управлінням та довгостроковим кліматичним плануванням. Цей нормативний вимір тісно пов'язаний з глобальними зобов'язаннями, спрямованими на скорочення викидів парникових газів, досягнення вуглецевої нейтральності та обмеження глобального потепління. Такі зобов'язання часто фігурують у національних кліматичних стратегіях та міжнародних угодах, які встановлюють цілі щодо скорочення викидів та шляхів низьковуглецевого розвитку [4, С. 112–115].

Як нормативна концепція, декарбонізація також відображає ширші етичні та політичні міркування, пов'язані з екологічною відповідальністю, міжпоколінньою справедливістю та глобальною співпрацею. Вона передбачає, що суспільства мають колективний обов'язок зменшити свій вплив на навколишнє середовище та розвивати стійкі економічні системи, здатні зберігати екологічний баланс для майбутніх поколінь [6, С. 95–97].

На найповнішому аналітичному рівні декарбонізацію можна інтерпретувати як цивілізаційний зсув, який трансформує фундаментальні структури сучасного індустріального суспільства. Ця перспектива визнає, що сучасні економічні системи історично розвивалися навколо вуглецевомістких джерел енергії, зокрема викопного палива, такого як вугілля та нафта. Отже, перехід до низьковуглецевих систем являє собою не просто технологічну зміну, а трансформацію основних основ індустріальної цивілізації [5].

Цивілізаційна інтерпретація декарбонізації підкреслює довгострокове історичне значення переходу до стійких енергетичних систем. Вона включає зміни у моделях виробництва, моделях споживання, розвитку міст та культурному

ставленні до екологічної відповідальності. Такі трансформації можуть змінити економічні структури, переосмислити соціальні пріоритети та вплинути на глобальну політичну динаміку [3, С. 120–123].

У цьому ширшому контексті декарбонізація стає частиною глобального переходу до більш сталої та екологічно відповідальної форми розвитку. Вчені все частіше описують цей перехід як новий етап в еволюції індустріального суспільства, в якому економічний прогрес має бути узгоджений з екологічною стійкістю та планетарними межами [7, С. 41–44].

Таким чином, концепція декарбонізації являє собою багатовимірне явище, що охоплює технологічні процеси, системні економічні трансформації, нормативні політичні рамки та довгострокові цивілізаційні зміни. Розуміння цих різних аналітичних вимірів є важливим для розробки комплексних стратегій, спрямованих на вирішення проблеми зміни клімату та забезпечення сталого розвитку. Складність концепції демонструє, що декарбонізація — це не просто технічний виклик, а глибока трансформація, що впливає на різні рівні сучасних соціальних та економічних систем [1; 4; 6].

Концепція декарбонізації стала одним із центральних елементів сучасної екологічної політики та глобального кліматичного управління. У сучасному науковому та політичному дискурсі декарбонізація все частіше розуміється не лише як технологічний чи економічний процес, але й як інституційний та політичний проект, що вимагає скоординованих дій урядів, міжнародних організацій та регуляторних органів [1]. Інституціоналізація декарбонізації відображає зростаюче визнання того, що пом'якшення наслідків зміни клімату вимагає структурованих механізмів управління, правових рамок та довгострокових політичних стратегій.

З інституційної точки зору, декарбонізація тісно пов'язана з розвитком глобальних структур кліматичного управління, призначених для координації міжнародних зусиль щодо скорочення викидів парникових газів. Міжнародні інституції відіграють вирішальну роль у встановленні норм, цілей та політичних

рамок, які керують національними стратегіями декарбонізації. Ці інституції забезпечують платформи для міжнародної співпраці, сприяють обміну технологічними інноваціями та сприяють колективним зобов'язанням, спрямованим на вирішення глобальних кліматичних проблем [7].

Одним із найважливіших подій в інституційному контексті декарбонізації стала поява комплексних міжнародних кліматичних угод та політичних рамок, які встановлюють довгострокові цілі щодо скорочення викидів. Такі угоди заохочують держави приймати національні стратегії, спрямовані на скорочення викидів вуглецю, просування технологій відновлюваної енергетики та підтримку сталого економічного розвитку [3, с. 44–46]. Ці інституційні механізми створюють скоординований глобальний підхід до пом'якшення зміни клімату, підкреслюючи як спільну відповідальність, так і диференційовані національні можливості.

На національному рівні уряди відіграють вирішальну роль у формуванні політичної та регуляторної бази, необхідної для реалізації політики декарбонізації. Державні установи відповідають за розробку законодавства, регуляторних механізмів та економічних стимулів, що сприяють переходу до низьковуглецевої економіки. Ця політика може включати системи ціноутворення на вуглець, субсидії на відновлювану енергетику, схеми торгівлі викидами та екологічні норми, спрямовані на зниження вуглецемісткості промислових та енергетичних систем [4, С. 56–57].

Інституційний контекст декарбонізації також передбачає участь наднаціональних політичних структур та регіональних механізмів управління. Регіональні політичні утворення все частіше приймають скоординовані стратегії, спрямовані на прискорення переходу до кліматично нейтральної економіки. Такі ініціативи часто включають інтегровану енергетичну політику, кліматичне законодавство та довгострокові інвестиційні стратегії, зосереджені на сталих технологіях та розвитку інфраструктури [5].

Ще один важливий вимір інституційної бази декарбонізації стосується взаємодії між політичними інститутами та економічними суб'єктами. Уряди та регуляторні органи часто співпрацюють з організаціями приватного сектору, дослідницькими установами та групами громадянського суспільства для просування технологічних інновацій та сталої економічної практики. Державно-приватні партнерства, програми фінансування досліджень та міжнародні ініціативи розвитку сприяють поширенню низьковуглецевих технологій та впровадженню стратегій декарбонізації в багатьох секторах економіки [6, С. 73–75].

Політичний вимір декарбонізації також відображає ширші дебати щодо екологічного управління, економічної конкурентоспроможності та соціальної справедливості. Політики повинні збалансувати екологічні цілі з пріоритетами економічного розвитку та соціальними міркуваннями. Отже, багато національних та міжнародних політик підкреслюють важливість справедливого переходу, гарантуючи, що перехід до низьковуглецевої економіки не створить непропорційного економічного тягаря для вразливих громад або певних секторів робочої сили [2, С. 41–44].

Крім того, інституціоналізація декарбонізації ілюструє зростаючу інтеграцію екологічних цілей у ширші рамки глобального управління. Кліматична політика стала невід'ємним компонентом міжнародної дипломатії, економічного співробітництва та планування розвитку. Уряди та міжнародні організації дедалі частіше розглядають декарбонізацію не лише як екологічну необхідність, а й як можливість для технологічних інновацій, економічної модернізації та сталого розвитку [3, С. 88–90].

Таким чином, інституційний та політичний контекст декарбонізації демонструє, що пом'якшення зміни клімату — це не лише технічний чи науковий виклик, а й складне питання управління, що включає багатьох учасників, політичні інструменти та інституційні структури. Ефективні стратегії декарбонізації вимагають скоординованих дій на глобальному, регіональному та національному

рівнях, що підтримуються узгодженими нормативно-правовими рамками та механізмами міжнародної співпраці.

Таким чином, аналіз інституційного та політичного контексту декарбонізації показує критичну роль, яку відіграють системи управління у формуванні переходу до низьковуглецевої економіки. Розуміння цієї інституційної динаміки є важливим для оцінки ефективності кліматичної політики та для розробки стратегій, здатних вирішувати екологічні та соціально-економічні проблеми, пов'язані з глобальною зміною клімату [1; 4; 6].

Концепція декарбонізації в сучасному науковому та політичному дискурсі все частіше розуміється як багатовимірне явище, що діє одночасно на кількох функціональних рівнях. Ці рівні відображають складність сучасних кліматичних проблем і демонструють, що скорочення викидів вуглецю вимагає скоординованих трансформацій в екологічних системах, економічних структурах, технологічному розвитку та інституційних структурах управління [1]. Тому аналіз декарбонізації через її функціональні виміри дозволяє глибше зрозуміти механізми, за допомогою яких відбувається перехід до низьковуглецевої економіки, і як різні сектори суспільства сприяють цьому процесу.

Таблиця 1.2

Функціональні рівні декарбонізації

<i>Рівень</i>	<i>Напрямок</i>	<i>Приклади</i>
<i>Екологічний</i>	Зменшення антропогенних змін клімату	Обмеження глобального потепління до 1,5°C; скорочення викидів в промисловості
<i>Економічний</i>	Перетворення виробництва та торгівлі	Впровадження ціни на вуглець; СВММ; стимулювання інновацій у чистих технологіях
<i>Технологічний</i>	Інновації та модернізація	Відновлювана енергетика; водень; ССС; акумулятори; розумні мережі
<i>Правовий / інституційний</i>	Інституціоналізація цілей	Паризька угода; національні стратегії; Європейська зелена угода

Джерело: складено автором

На екологічному рівні декарбонізація, перш за все, стосується скорочення викидів парникових газів з метою пом'якшення зміни клімату та стабілізації глобальних екологічних систем. Вуглекислий газ та інші парникові гази, що виділяються в результаті промислової діяльності, виробництва енергії та транспортування, значною мірою сприяють глобальному потеплінню та деградації навколишнього середовища. Отже, стратегії екологічної декарбонізації зосереджені на скороченні викидів, захисті природних екосистем та підтримці екологічного балансу [7].

У цих рамках декарбонізація сприяє збереженню біорізноманіття, захисту природних ресурсів та стабілізації глобальних кліматичних систем. Екологічні дослідження підкреслюють, що значне скорочення викидів вуглецю є важливим для обмеження підвищення глобальної температури та запобігання незворотній екологічній шкоді. Тому екологічний вимір декарбонізації є критично важливим компонентом глобальної екологічної стійкості та довгострокової планетарної стабільності [3, с. 56–57].

З економічної точки зору, декарбонізація передбачає трансформацію виробничих систем, ринків та економічних структур з метою зниження вуглецевої інтенсивності, зберігаючи при цьому економічне зростання та соціальне добробут. Традиційні економічні системи історично значною мірою покладалися на викопне паливо як основні джерела енергії. Як наслідок, перехід до низьковуглецевої економіки вимагає значних структурних змін у виробництві енергії, промислових процесах та моделях споживання [4].

Стратегії економічної декарбонізації часто включають впровадження механізмів ціноутворення на вуглець, просування галузей відновлюваної енергетики та розробку стійких економічних моделей, які інтегрують екологічні міркування в ринкові структури. Інвестиції в зелені технології, стійку інфраструктуру та низьковуглецеві інновації відіграють центральну роль у сприянні цьому економічному переходу. У цьому контексті декарбонізація стає рушійною

силою економічної модернізації та технологічної конкурентоспроможності [5, с. 72–74].

Крім того, економічний вимір декарбонізації тісно пов'язаний з концепцією зеленої економіки, яка прагне узгодити економічний розвиток з екологічною стійкістю. Заохочуючи ефективне використання ресурсів, розвиток відновлюваної енергетики та екологічно відповідальні методи виробництва, декарбонізація сприяє створенню стійких та сталих економічних систем [8, с. 41–44].

Технологічні інновації є ще одним ключовим функціональним виміром декарбонізації. Досягнення значного скорочення викидів вуглецю вимагає розробки та широкого впровадження передових технологій, здатних замінити вуглецеємні процеси. Ці технології включають системи відновлюваної енергії, рішення для накопичення енергії, електричний транспорт та технології уловлювання та зберігання вуглецю [3, с. 98–101].

Технологічна декарбонізація також передбачає підвищення енергоефективності та модернізацію промислових процесів. Інновації в цифрових технологіях, інтелектуальні енергетичні мережі та практики сталого виробництва сприяють зменшенню вуглецевого сліду економічної діяльності. Крім того, дослідницькі та розробницькі ініціативи, що підтримуються урядами та міжнародними організаціями, відіграють важливу роль у прискоренні поширення низьковуглецевих технологій на світових ринках [4, с. 89–91].

Таким чином, технологічний вимір демонструє, що декарбонізація тісно пов'язана з науковим прогресом та інноваціями. Розробка нових технологічних рішень не лише сприяє скороченню викидів, але й створює можливості для економічного зростання та технологічного лідерства в нових зелених галузях промисловості.

Правовий та інституційний рівень декарбонізації стосується структур управління, регуляторних рамок та політичних інструментів, які спрямовують та координують стратегії скорочення викидів. Ефективна декарбонізація вимагає

комплексних правових систем, які встановлюють екологічні стандарти, регулюють промислові викиди та створюють стимули для сталої економічної поведінки [6].

Уряди та міжнародні організації відіграють вирішальну роль у розробці цих регуляторних рамок через екологічне законодавство, кліматичну політику та міжнародні угоди. Політичні інструменти, такі як вуглецеві податки, системи торгівлі викидами, мандати на відновлювану енергетику та екологічні стандарти, забезпечують інституційні механізми, необхідні для впровадження стратегій декарбонізації в різних секторах економіки [5, С. 95–97].

Міжнародна співпраця також є важливим компонентом правового та інституційного виміру декарбонізації. Глобальні екологічні проблеми вимагають скоординованих політичних відповідей за участю багатьох країн та міжнародних установ. За допомогою спільних рамок та багатосторонніх угод уряди прагнуть гармонізувати кліматичну політику та сприяти колективним діям, спрямованим на скорочення глобальних викидів парникових газів [3, С. 120–123].

Таким чином, концепція декарбонізації діє одночасно на екологічному, економічному, технологічному та правово-інституційному рівнях. Кожен із цих вимірів являє собою певний функціональний аспект ширшої трансформації до низьковуглецевого розвитку. Розуміння взаємодії між цими рівнями є важливим для розробки ефективної кліматичної політики та впровадження комплексних стратегій, здатних вирішувати складні проблеми, пов'язані з глобальною зміною клімату. Багатовимірний характер декарбонізації підкреслює, що стійка екологічна трансформація вимагає скоординованих дій між екологічними системами, економічними структурами, технологічними інноваціями та інституціями управління [1; 4; 8].

У сучасному академічному та політичному дискурсі концепція декарбонізації зазнала значного семантичного розвитку та концептуального розширення. Спочатку використовувана як технічний термін, що описує зменшення вмісту вуглецю в промислових процесах, концепція поступово перетворилася на

багатовимірну категорію, що охоплює екологічну політику, економічну трансформацію, технологічні інновації та механізми глобального управління [1]. Це семантичне та дискурсивне розширення відображає зростаючу важливість пом'якшення наслідків зміни клімату в сучасних наукових дослідженнях та міжнародних політичних програмах.

Семантична еволюція концепції декарбонізації ілюструє, як наукова термінологія адаптується до нових глобальних викликів та міждисциплінарних дослідницьких рамок. У своєму найдавнішому технічному використанні декарбонізація стосувалася переважно хімічних та металургійних процесів, що включають видалення вуглецю з металевих сплавів або промислових матеріалів. Однак, оскільки екологічні проблеми щодо зміни клімату посилювалися наприкінці ХХ століття, термін поступово набув ширших екологічних та соціально-економічних значень [2].

У сучасному науковому дискурсі декарбонізація широко використовується для опису стратегій, спрямованих на скорочення викидів парникових газів з енергетичних систем, промислового виробництва, транспорту та сільського господарства. Ця концепція зараз функціонує як ключова аналітична категорія в кліматологічній науці, енергетичній політиці, екологічній економіці та дослідженнях сталого розвитку [3, с. 56–58]. Це розширення відображає зростаюче визнання того, що боротьба зі зміною клімату вимагає комплексних трансформацій у багатьох секторах світової економіки.

Дискурсивне розширення терміна також передбачає його інтеграцію в ширші наративи сталого розвитку та глобального екологічного управління. Політики, міжнародні організації та дослідницькі установи часто використовують концепцію декарбонізації як центральний елемент стратегій пом'якшення наслідків зміни клімату та довгострокового планування розвитку. У цих дискурсивних рамках декарбонізація часто асоціюється з такими пов'язаними концепціями, як

енергетичний перехід, кліматична нейтральність, зелена економіка та сталий розвиток [4, с. 72–74].

Крім того, семантичне розширення декарбонізації відображає зростаючу міждисциплінарність досліджень, пов'язаних з кліматом. Вчені з таких галузей, як економіка, політологія, екологічні дослідження, інженерія та соціологія, роблять свій внесок у розвиток концепції, досліджуючи різні виміри низьковуглецевого переходу. В результаті, ця концепція функціонує не лише як описовий науковий термін, але й як нормативна та стратегічна основа, що керує політикою екологічного управління та сталого розвитку [5].

Ще один важливий аспект дискурсивного розвитку декарбонізації стосується її ролі у формуванні публічних дебатів щодо зміни клімату та глобальної екологічної відповідальності. Уряди, міжнародні організації та суб'єкти громадянського суспільства все частіше використовують цю концепцію в політичних документах, кліматичних стратегіях та ініціативах з публічної комунікації, спрямованих на підвищення екологічної обізнаності та заохочення сталої поведінки. Таке широке використання концепції демонструє її перетворення на центральний елемент сучасного екологічного дискурсу [8, с. 41–44].

Розширення концепції декарбонізації призвело до появи численних онтологічних інтерпретацій, які відображають різні аналітичні перспективи щодо природи цього явища. У сучасних міждисциплінарних дослідженнях декарбонізацію можна класифікувати на кілька онтологічних категорій залежно від того, як концепція інтерпретується в конкретних теоретичних та практичних контекстах.

Однією з важливих онтологічних форм декарбонізації є її інтерпретація як технологічного явища. У цій перспективі декарбонізація стосується розробки та впровадження технологій, призначених для скорочення викидів вуглецю, включаючи системи відновлюваної енергії, енергоефективні промислові процеси та технології уловлювання вуглецю. Таке тлумачення підкреслює роль наукових

інновацій та технологічного прогресу у досягненні шляхів низьковуглецевого розвитку [3, С. 98–101].

Інша онтологічна категорія концептуалізує декарбонізацію як економічну трансформацію, що включає структурні зміни у виробничих системах, ринкових структурах та глобальних економічних відносинах. З цієї точки зору, декарбонізація вимагає реструктуризації промислових секторів, моделей інвестування та економічної політики з метою зниження вуглецевої інтенсивності економічної діяльності, зберігаючи при цьому сталий розвиток [4, С. 89–91].

Декарбонізацію також можна інтерпретувати як інституційне та управлінське явище, що відображає розвиток правових рамок, регуляторних механізмів та міжнародних угод, спрямованих на координацію глобальних зусиль щодо пом'якшення зміни клімату. Ця перспектива підкреслює роль політичних інститутів, державної політики та міжнародної співпраці у формуванні впровадження стратегій декарбонізації в різних країнах та регіонах [5, С. 95–97].

Крім того, вчені все частіше інтерпретують декарбонізацію як соціально-культурну трансформацію, яка впливає на ставлення громадськості, моделі споживання та культурні цінності, пов'язані з екологічною стійкістю. Ця інтерпретація підкреслює важливість соціальної свідомості, зміни поведінки та культурної адаптації для підтримки переходу до низьковуглецевих суспільств [8].

Нарешті, декарбонізацію можна розуміти як системне явище, яке інтегрує технологічні, економічні, інституційні та соціальні трансформації у комплексний процес глобального екологічного переходу. Ця системна перспектива визнає, що ефективна декарбонізація вимагає скоординованих дій на різних рівнях суспільства та структур управління. Вона підкреслює взаємопов'язаний характер екологічних проблем та необхідність комплексних рішень, здатних вирішувати проблему зміни клімату цілісним чином [6, С. 120–123].

Таким чином, семантичне та дискурсивне розширення концепції декарбонізації відображає динамічну еволюцію наукової термінології у відповідь

на глобальні екологічні виклики. Водночас, онтологічна типологія декарбонізації демонструє багатогранну природу цього явища, яке охоплює технологічні інновації, економічну реструктуризацію, інституційне управління та соціально-культурну трансформацію. Розуміння цих різних вимірів є важливим для розробки комплексних стратегій, спрямованих на досягнення сталого розвитку та пом'якшення наслідків глобальної зміни клімату [1; 4; 8].

Концепція декарбонізації займає дедалі значніше місце в сучасному науковому дискурсі, пов'язаному зі зміною клімату, сталим розвитком та глобальним екологічним управлінням. Окрім технологічних, економічних та політичних вимірів, цю концепцію також можна розглядати з онтологічної точки зору, яка досліджує фундаментальну природу явища, яке вона представляє. Онтологічний аналіз дозволяє дослідникам розглядати декарбонізацію не лише як практичну політичну мету, а й як структурну характеристику сучасної соціально-економічної трансформації та змін навколишнього середовища [1].

Онтологічна інтерпретація зосереджується на розумінні природи, структури та існування явищ у складних системах. У контексті екологічних досліджень та досліджень сталого розвитку онтологічні підходи використовуються для аналізу фундаментальних процесів, що формують взаємозв'язок між людським суспільством та природними системами. З цієї точки зору, декарбонізацію можна інтерпретувати як багатовимірне явище, що відображає глибокі трансформації в організації сучасної промислової цивілізації та глобальних енергетичних систем [2].

З онтологічної точки зору, декарбонізацію можна спочатку розуміти як процес, який розгортається з часом через поступову трансформацію технологічних, економічних та екологічних систем. Цей процес передбачає систематичне скорочення викидів вуглецю, що утворюються в результаті виробництва енергії, промислової діяльності, транспорту та інших секторів економіки [3, С. 56–57].

У цій інтерпретації декарбонізація являє собою динамічну та безперервну трансформацію, а не окрему подію чи ізольовану технологічну інновацію. Процес

включає кілька взаємопов'язаних етапів, включаючи розвиток відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності, електрифікацію промислових та транспортних систем, а також впровадження технологій уловлювання вуглецю. Кожен з цих етапів сприяє поступовій реструктуризації енергетичних систем та скороченню викидів парникових газів [4, С. 72–74].

Онтологічна характеристика декарбонізації як процесу також підкреслює часовий та еволюційний характер екологічної трансформації. Стратегії пом'якшення зміни клімату впроваджуються протягом тривалих періодів часу та передбачають складну взаємодію між технологічними інноваціями, економічною адаптацією та інституційним управлінням. Отже, декарбонізацію слід розуміти як довгострокову траєкторію системних змін, а не як короткострокове політичне втручання.

Окрім інтерпретації як динамічного процесу, декарбонізацію також можна онтологічно концептуалізувати як структурну трансформацію соціально-економічних та технологічних систем. Ця перспектива визнає, що сучасні індустріальні суспільства історично розвивалися навколо вуглецевомістких джерел енергії, таких як вугілля, нафта та природний газ. Як наслідок, перехід до низьковуглецевих систем вимагає фундаментальних змін у структурних основах виробництва, інфраструктури та економічної організації [5].

Структурна декарбонізація передбачає реконфігурацію енергетичних систем, промислових виробничих мереж, транспортної інфраструктури та моделей міського розвитку. Ці трансформації часто супроводжуються змінами в економічній політиці, інвестиційних стратегіях та моделях технологічних інновацій. У цьому сенсі декарбонізація стає структурною реорганізацією систем, що підтримують сучасну економічну діяльність та соціальний розвиток [6, С. 98–101].

Крім того, структурна трансформація включає зміни в інституційних рамках та структурах управління, які регулюють економічну та екологічну діяльність. Уряди та міжнародні організації запроваджують регуляторні механізми, екологічні

стандарти та політичні стимули, спрямовані на прискорення переходу до низьковуглецевого розвитку. Ці інституційні корективи підсилюють структурний характер декарбонізації шляхом вбудовування екологічних цілей в економічні та політичні системи.

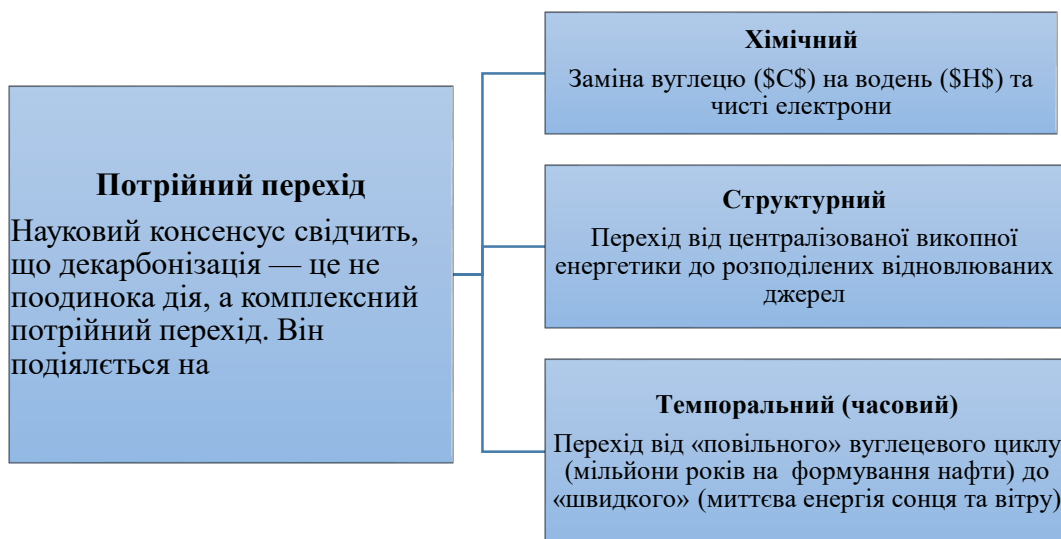


Рис. 1.3. Структурна трансформація декарбонізації

Джерело: складено автором

Онтологія декарбонізації стосується ширшої філософської та концептуальної основи, яка визначає природу та існування цього явища в рамках глобальних соціально-економічних та екологічних систем. З онтологічної точки зору, декарбонізація являє собою складну взаємодію між технологічною діяльністю людини, економічним розвитком та природними екологічними процесами.

У сучасних дослідженнях сталого розвитку декарбонізацію часто розглядають як системну відповідь на екологічні проблеми, пов'язані з індустріалізацією та широким використанням викопного палива. Це явище виникає з необхідності узгодити економічний розвиток з екологічною стійкістю та планетарними межами. Отже, онтологія декарбонізації відображає трансформацію у взаємовідносинах між суспільством та природним середовищем [7].

Ця онтологічна перспектива підкреслює, що декарбонізація не обмежується лише скороченням викидів. Швидше, вона являє собою ширшу зміну парадигми в організації економічних систем, технологічної інфраструктури та соціальних практик. Перехід до низьковуглецевих систем передбачає переосмислення принципів виробництва, споживання та екологічного управління з метою забезпечення довгострокової екологічної стабільності та сталого розвитку.

Більше того, онтологія декарбонізації підкреслює взаємопов'язаний характер екологічних, економічних та соціальних систем. Пом'якшення наслідків зміни клімату не може бути досягнуто лише за допомогою ізольованих технологічних рішень; це вимагає комплексних підходів, що враховують численні виміри глобального розвитку. Як результат, декарбонізація функціонує як системна концепція, що інтегрує технологічні інновації, інституційне управління, економічну трансформацію та соціально-культурні зміни [3, с. 120–123].

Таким чином, онтологічна інтерпретація декарбонізації розкриває глибші структурні та філософські основи сучасних процесів трансформації клімату. Розглядаючи декарбонізацію як процес, так і структурну трансформацію, дослідники можуть краще зрозуміти системний характер переходу до низьковуглецевих суспільств. Водночас, ширша онтологія декарбонізації підкреслює її значення як ключової концепції, що описує еволюцію взаємозв'язку між людською цивілізацією та глобальним навколишнім середовищем в епоху зміни клімату [1; 4; 6].

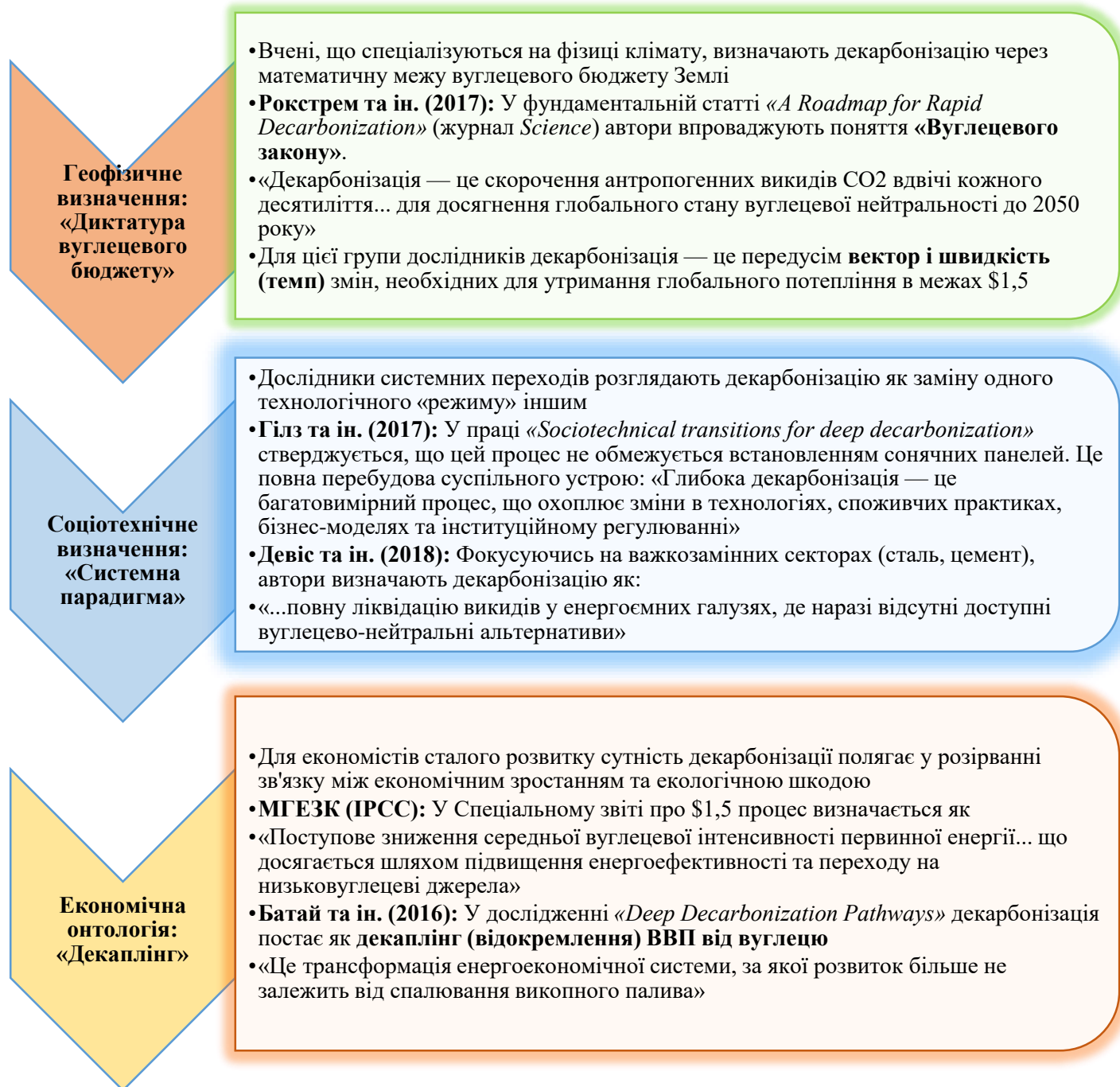


Рис. 1.4. Архітекторніка концепту «декарбонізації»

Джерело: складено автором

Таким чином можна запропонувати наступні рекомендації по розгляду концепту декарбонізації.

- інтегровані політичні підходи;

Декарбонізація повинна здійснюватися через скоординовану політику, яка узгоджує енергетичні, економічні, екологічні та соціальні цілі, а не окремі заходи.

- інвестиції в технології та інновації;

Надавати пріоритет розвитку та впровадженню систем відновлюваної енергії, енергоефективних технологій та інновацій у сфері скорочення викидів вуглецю.

- інституційне зміцнення;

Створювати надійні правові та інституційні рамки для забезпечення підзвітності, моніторингу прогресу та сприяння співпраці між урядами, бізнесом та громадянським суспільством.

- залучення громадськості та освіта;

Заохочувати підвищення обізнаності та зміни поведінки в суспільстві для підтримки моделей сталого споживання та кліматично свідомої практики.

- цілісне планування;

Розглядати декарбонізацію як довгострокову системну трансформацію, яка впливає не лише на промисловість та інфраструктуру, але й на соціальні структури, культурні норми та системи глобального управління.

На завершення, декарбонізація – це багатовимірна трансформація, яка вимагає цілісних стратегій, міждисциплінарної співпраці та стійкої відданості на кожному рівні суспільства. Поєднуючи технологічні інновації, економічну реструктуризацію, політичне управління та культурну адаптацію, можна рухатися до сталого, низьковуглецевого майбутнього, одночасно сприяючи соціальній рівності та екологічній стійкості.

1.2. Еволюція наукових досліджень декарбонізації, їх історичний розвиток та ключові наукові підходи

1. Ранні інтелектуальні витоки досліджень декарбонізації (1970-ті – 1980-ті роки)

Хоча термін «декарбонізація» не був широко поширеним у науковому дискурсі 1970-х років, його концептуальні передумови сформувалися саме в цей період у рамках досліджень енергетичних систем, енергетичної безпеки та політичних дискусій, викликаних глобальною енергетичною кризою. Нафтовий шок 1973 року став одним із ключових факторів, що стимулював інтенсивні дослідження альтернативних джерел енергії та можливостей поступового переходу від викопного палива до більш стійких енергетичних систем.

Одним із перших значущих внесків у формування концептуальних засад майбутніх досліджень декарбонізації стала робота американського дослідника енергетичної політики Аморі Ловінса. У 1976 році він опублікував у журналі *Foreign Affairs* статтю «Energy Strategy: The Road Not Taken», у якій запропонував альтернативну енергетичну стратегію, що передбачала перехід від централізованих систем виробництва енергії на основі викопного палива до підвищення енергоефективності та розвитку відновлюваних джерел енергії. Ідеї Ловінса стали важливим теоретичним підґрунтям сучасної концепції декарбонізації енергетичних систем.

Паралельно з енергетичними дослідженнями активно розвивалася кліматична наука, яка почала встановлювати причинно-наслідковий зв'язок між спалюванням викопного палива та зростанням концентрації діоксиду вуглецю в атмосфері. Важливу емпіричну основу для цих досліджень створили довгострокові вимірювання атмосферного CO₂, розпочаті Чарльзом Девідом Кілінгом у 1958 році на обсерваторії Мауна-Лоа на Гавайях. Ці вимірювання, відомі як «крива Кілінга», продемонстрували стабільне зростання концентрації вуглекислого газу в атмосфері та стали одним із ключових доказів антропогенного впливу на кліматичну систему.

До 1980-х років економісти почали інтегрувати кліматичні аспекти у макроекономічні моделі розвитку. Значний внесок у цей напрям зробив американський економіст Вільям Д. Нордхаус, який розробив інтегровані моделі оцінки (Integrated Assessment Models – IAM), що поєднують економічний розвиток, енергетичні системи та кліматичні зміни. Зокрема, модель DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy Model), опублікована Нордхаусом у 1992 році, формалізувала взаємозв'язок між економічною діяльністю, викидами парникових газів та кліматичною політикою, заклавши основу для аналізу економічно ефективних стратегій декарбонізації.

Таким чином, у 1970–1980-х роках було сформовано інтелектуальні передумови для подальшого розвитку досліджень декарбонізації, які поєднували енергетичну політику, кліматичну науку та економічне моделювання.

2. Інституціоналізація досліджень декарбонізації (1990-ті роки)

Наступний етап розвитку досліджень декарбонізації характеризується їх поступовою інституціоналізацією на міжнародному рівні. Важливим кроком стало створення у 1988 році Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC), яка об'єднала провідних науковців для оцінки наукових даних щодо зміни клімату.

Перший оціночний звіт IPCC, опублікований у 1990 році, узагальнив наявні наукові докази того, що антропогенні викиди парникових газів, зокрема внаслідок використання викопного палива, сприяють глобальному потеплінню. Цей звіт став важливим науковим підґрунтям для формування міжнародної кліматичної політики.

У 1992 році було прийнято Рамкову конвенцію Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (UNFCCC), яка стала першим глобальним політичним інструментом, спрямованим на стабілізацію концентрації парникових газів в атмосфері. Подальшим кроком стало підписання Кіотського протоколу у 1997 році, який встановив юридично обов'язкові цілі щодо скорочення викидів для промислово розвинених країн.

Саме в цей період термін «декарбонізація» почав поступово входити до академічного дискурсу. Систематичні огляди літератури свідчать, що перші наукові публікації, у яких цей термін використовується у кліматичному контексті, з'явилися приблизно у 1995 році. Зокрема, дослідники Туркенбург та Аузубель у своїх роботах розглядали довгострокові стратегії скорочення викидів CO₂ та трансформацію енергетичних систем.

3. Теоретична консолідація досліджень декарбонізації (2000-ті роки)

У 2000-х роках дослідження декарбонізації набули більш системного характеру та стали невід'ємною частиною науки про сталий розвиток, енергетичні переходи та екологічну економіку.

Одним із ключових теоретичних внесків цього періоду стала концепція соціально-технічних переходів, запропонована Френком В. Гілзом. У своїй статті 2002 року в журналі *Research Policy* він розробив теоретичну модель багаторівневої перспективи (Multi-Level Perspective – MLP), яка пояснює трансформацію технологічних систем через взаємодію інноваційних ніш, домінуючих технологічних режимів та ширших соціально-економічних факторів. Цей підхід широко використовується для аналізу переходу до низьковуглецевих енергетичних систем.

У 2004 році значний вплив на дослідження кліматичної політики справила робота Стівена Пакали та Роберта Соколова, які запропонували концепцію «стабілізаційних клинів». У своїй статті в журналі *Science* вони продемонстрували, що скорочення глобальних викидів може бути досягнуто шляхом поєднання декількох технологічних стратегій, включаючи розвиток відновлюваної енергетики, підвищення енергоефективності та технології уловлювання та зберігання вуглецю.

Важливим економічним аргументом на користь активної кліматичної політики став Огляд Стерна (2006), підготовлений під керівництвом Ніколаса Стерна для уряду Великої Британії. У цьому дослідженні було доведено, що

економічні втрати від бездіяльності щодо зміни клімату можуть значно перевищувати витрати на впровадження політики скорочення викидів.

4. Сучасний етап розвитку досліджень декарбонізації (2010-ті – 2020-ті роки)

Починаючи з 2010-х років дослідження декарбонізації значно розширилися та охопили широкий спектр дисциплін, включаючи економіку, енергетичну інженерію, урбаністику та політичні науки.

Важливим поворотним моментом у розвитку глобальної кліматичної політики стало підписання Паризької угоди у 2015 році. Ця міжнародна угода встановила ціль обмеження глобального потепління до рівня значно нижче 2°C із прагненням обмежити його до 1,5°C.

У Спеціальній доповіді IPCC про глобальне потепління на 1,5°C (2018) було наголошено, що досягнення цієї мети потребує «швидких та масштабних трансформацій у енергетичних, транспортних, промислових та міських системах».

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється сценаріям досягнення нульового рівня викидів. Зокрема, роботи Глена Пітерса присвячені аналізу глобального вуглецевого бюджету та оцінці необхідних темпів скорочення викидів для досягнення кліматичних цілей.

5. Основні напрями сучасних досліджень декарбонізації

Сучасна наукова література з декарбонізації охоплює кілька ключових напрямів досліджень.

По-перше, значна увага приділяється теорії енергетичного переходу, яка досліджує структурні зміни в енергетичних системах та поступовий перехід від викопного палива до відновлюваних джерел енергії.

По-друге, важливим напрямом є дослідження ринкових механізмів кліматичної політики, зокрема систем ціноутворення на вуглець, податків на викиди та систем торгівлі квотами.

По-третє, активно досліджується роль технологічних інновацій у декарбонізації, включаючи розвиток відновлюваної енергетики, електрифікацію транспорту та цифровізацію енергетичних систем.

Нарешті, значну увагу привертають критичні підходи, зокрема концепція дезростання, прихильники якої вважають, що повне відокремлення економічного зростання від зростання викидів може бути складним або навіть неможливим без фундаментальної трансформації економічних моделей виробництва та споживання.

б. Основні теоретичні підходи до дослідження декарбонізації

У сучасній науковій літературі процес декарбонізації розглядається через призму різних теоретичних підходів, які пояснюють механізми зменшення викидів парникових газів, трансформацію енергетичних систем та взаємозв'язок між економічним розвитком і екологічною стійкістю. Ці підходи сформувалися на перетині економічної теорії, екологічної економіки, політичної економії, технологічних досліджень та науки про сталий розвиток. Різні наукові концепції по-різному інтерпретують рушійні сили декарбонізації. Одні теорії наголошують на ролі економічного зростання та ринкових механізмів, інші підкреслюють значення технологічних інновацій, інституційних змін або соціальних факторів. У результаті сформувався широкий спектр підходів, які по-різному оцінюють можливості поєднання економічного розвитку зі скороченням викидів парникових газів.

Кожен підхід пропонує власну концептуальну модель та інструменти, які можна застосовувати для розробки стратегій декарбонізації на національному та міжнародному рівнях. Зокрема, частина теорій акцентує увагу на економічних стимулах та ринкових механізмах, тоді як інші досліджують технологічні та соціальні трансформації енергетичних систем. Важливо зазначити, що більшість сучасних концепцій інтегрують кілька аспектів одночасно, поєднуючи економічні, технологічні та соціальні чинники. Деякі підходи також включають оцінку політичних, культурних та інституційних бар'єрів, які можуть уповільнювати процес декарбонізації. Така комплексна перспектива дозволяє дослідникам більш

глибоко аналізувати взаємозв'язки між економічними інтересами, технологічними інноваціями та екологічними цілями.

Для систематизації основних наукових підходів до аналізу процесів декарбонізації доцільно узагальнити їх ключові характеристики, основні ідеї, механізми реалізації та наукові дискусії. Така систематизація представлена в таблиці 1.

Таблиця 1.3

Основні теорії декарбонізації та їх характеристика

№	Теорія	Основна ідея	Застосування до декарбонізації	Ключові науковці / інституції	Основний механізм / інструменти	Критика / дискусії
1.	Теорія екологічної кривої Кузнеця (ЕКС)	Економічне зростання спочатку погіршує стан довкілля, але після певного рівня доходу починається його покращення.	Розвинені країни інвестують у чисті технології та екологічну політику, що знижує вуглецеву інтенсивність.	Джин Гроссман, Алан Крюгер	Структурні зміни економіки, технологічна модернізація, екологічне регулювання	Дані щодо CO ₂ неоднозначні; глобальні викиди не завжди зменшуються автоматично зі зростанням доходів.
2.	Теорія екологічної модернізації (ТЕМ)	Індустріальні суспільства можуть реформуватися через технології та інституційні зміни без відмови від економічного зростання.	Декарбонізація через зелені інновації, реформу політики та корпоративну екологічну відповідальність.	Артур П. Дж. Мол, Герт Спааргарен	Зелені технології, ринкові інструменти, екологічна політика	Критики вважають, що реформи недостатні без системної трансформації економіки.
3.	Теорія соціально-технічного переходу (багаторівнева перспектива)	Енергетичні переходи – це довготривалі системні зміни, що включають технології, інституції та соціальні практики.	Перехід від викопного палива до відновлюваної енергетики через інновації та політичні зміни.	Френк В. Гілз	Ніші (інновації), режими (існуючі системи), ландшафт (макротренди)	Перехід може бути повільним через інституційну інерцію.
4.	Теорія інновацій та	Технологічний прогрес є	Інновації в енергетиці,	Вільям Нордхаус	Ціноутворення на вуглець	Технологічні рішення

	технологічних змін	ключовим фактором зменшення викидів.	транспорті та промисловості знижують вуглецеву інтенсивність.		→ стимул інновацій → зниження витрат → масове впровадження	можуть бути недостатніми без політичних змін.
5.	Теорія ціноутворення на вуглець	Ринки можуть ефективно зменшувати викиди, якщо враховують екологічні зовнішні ефекти.	Використання податків на вуглець і систем торгівлі викидами.	Економічна теорія А. Пігу	Податок на вуглець, системи торгівлі викидами (ETS)	Політична складність впровадження; ризик соціальної нерівності.
6.	Теорія дезростання (degrowth)	Неможливо повністю декарбонізувати економіку, що постійно зростає.	Пропонує скорочення споживання, зміну економічних моделей та переорієнтацію на добробут.	Тім Джексон, Джейсон Хікель	Зменшення споживання, локалізація економіки, нові моделі розвитку	Критики вважають, що економічне скорочення може викликати соціальні проблеми.
7.	Теорія зеленого зростання	Економічне зростання може поєднуватися зі зменшенням викидів.	Перехід на відновлювану енергію та підвищення ефективності ресурсів.	Організація економічного співробітництва та розвитку	Інвестиції у ВДЕ, енергоефективність, цифровізація	Дискусії щодо можливості і абсолютного відокремлення зростання від викидів.
8.	Політична економія декарбонізації	Політичні інститути та економічні інтереси впливають на темпи переходу до низьковуглецевої економіки.	Аналіз ролі лобіювання, державної політики та інституційних бар'єрів.	Джеффри М. Ходжсон	Інституційні зміни, подолання залежності від викопного палива	Потужні економічні інтереси можуть блокувати трансформації.
9.	Теорія систем та складності	Енергетичні та кліматичні системи є складними і нелінійними.	Декарбонізація може відбуватися через переломні моменти в системі.	Розвивається у дослідженнях клімату та стійкості	Зворотні зв'язки, переломні точки, адаптивні системи	Важко прогнозувати точні сценарії переходу.
10.	Теорія справедливого переходу	Перехід до низьковуглецевої економіки має бути соціально справедливим.	Захист працівників, перекваліфікація та підтримка	Міжнародна організація праці	Соціальна політика, програми зайнятості,	Вимагає значних фінансових ресурсів та політичної

			регіонів, залежних від викопного палива.		регіональна підтримка	координаці ї.
--	--	--	---	--	--------------------------	------------------

Джерело: складено автором

У таблиці представлено систематизацію основних теоретичних підходів до дослідження процесів декарбонізації економіки. Декарбонізація розглядається як комплексна трансформація економічних, технологічних та соціальних систем, спрямована на зменшення викидів парникових газів, насамперед діоксиду вуглецю (CO₂), та перехід до низьковуглецевої моделі розвитку.

Представлені теорії відображають різні наукові підходи до пояснення механізмів зменшення вуглецевої інтенсивності економіки. Частина з них ґрунтується на економічних моделях зростання та ринкових механізмах (теорія екологічної кривої Кузнеця, теорія ціноутворення на вуглець, теорія зеленого зростання), інші акцентують увагу на ролі технологічних інновацій та структурних змін у виробництві (теорія інновацій та технологічних змін, теорія соціально-технічного переходу). Окрему групу становлять теорії, які підкреслюють соціально-інституційні аспекти трансформації економіки, зокрема політичну економію декарбонізації та теорію справедливого переходу.

Водночас у сучасній науковій дискусії існують різні погляди на можливість поєднання економічного зростання із суттєвим скороченням викидів. Так, концепція зеленого зростання передбачає можливість досягнення економічного розвитку паралельно зі зменшенням вуглецевої інтенсивності завдяки технологічному прогресу та інвестиціям у відновлювану енергетику. Натомість теорія дезростання ставить під сумнів можливість повного відокремлення економічного зростання від екологічного навантаження та наголошує на необхідності структурних змін у моделях виробництва і споживання.

Таким чином, наведена таблиця відображає міждисциплінарний характер дослідження декарбонізації, який поєднує економічні, технологічні, соціальні та політичні підходи до аналізу переходу до низьковуглецевої економіки.

Порівняльний аналіз теоретичних підходів до декарбонізації

Після узагальнення основних теорій декарбонізації важливо оцінити їх відмінності та подібності з точки зору рушійних чинників, погляду на економічне зростання та механізмів зниження викидів парникових газів. Такий порівняльний підхід дозволяє не лише систематизувати наявні наукові концепції, а й зрозуміти, які теоретичні моделі є найбільш релевантними для аналізу сучасних стратегій переходу до низьковуглецевої економіки.

У цьому контексті доцільним є представлення порівняльної таблиці, яка демонструє ключові відмінності та точки перетину основних теоретичних підходів до декарбонізації.

Таблиця 1.4

Порівняльний аналіз ключових теоретичних підходів до декарбонізації

Теорія	Основний рушійний чинник	Погляд на економічне зростання	Механізм
ЕКС (Екологічна крива Кузнеця)	Зростання доходів	Зростання з часом зменшує викиди	Структурні зрушення
Екологічна модернізація	Інновації та реформи	Сумісна зі зростанням	Технологічні реформи
Соціотехнічний перехід	Динаміка систем	Структурні зміни	Багаторівнева взаємодія
Вуглецеве ціноутворення	Ринкові сигнали	Нейтральне щодо зростання	Цінові стимули
Зелене зростання	Технології та ефективність	Сумісне зі зростанням	Інвестиції та інновації
Дегрост (постзростання)	Скорочення споживання	Зростання є проблемним	Економічна реструктуризація
Справедливий перехід	Соціальна справедливість	Умовно сумісний	Перерозподільна політика

Джерело: складено автором

Представлена таблиця відображає порівняльну характеристику основних теоретичних підходів до декарбонізації економіки з точки зору рушійних чинників, ставлення до економічного зростання та механізмів зниження викидів парникових газів. Аналіз цих теорій дозволяє зрозуміти різноманітність наукових підходів до пояснення переходу до низьковуглецевої моделі розвитку.

Теорія екологічної кривої Кузнеця (ЕКС) базується на припущенні, що між економічним розвитком і рівнем забруднення існує нелінійний зв'язок. На початкових етапах економічного зростання рівень викидів зазвичай збільшується, оскільки розвиток промисловості супроводжується інтенсивним використанням природних ресурсів і викопного палива. Однак після досягнення певного рівня доходу суспільство починає приділяти більше уваги екологічним проблемам, що сприяє впровадженню чистіших технологій, структурним змінам в економіці та посиленню екологічного регулювання.

Теорія екологічної модернізації акцентує увагу на ролі технологічних інновацій та інституційних реформ у зменшенні екологічного навантаження. Згідно з цим підходом, економічне зростання може бути сумісним із захистом довкілля, якщо розвиток виробництва супроводжується модернізацією технологій, підвищенням енергоефективності та впровадженням екологічно орієнтованої державної політики.

Соціотехнічна теорія переходу розглядає декарбонізацію як складний системний процес, що охоплює взаємодію технологічних інновацій, інституційних змін та соціальних практик. У цьому контексті трансформація енергетичних систем відбувається через багаторівневу взаємодію між новими технологічними рішеннями, домінуючими виробничими структурами та ширшими соціально-економічними факторами.

Теорія вуглецевого ціноутворення ґрунтується на використанні ринкових механізмів для скорочення викидів. Її основна ідея полягає у встановленні економічної ціни на викиди вуглецю через такі інструменти, як податок на вуглець

або системи торгівлі квотами. Це створює фінансові стимули для підприємств зменшувати викиди, впроваджувати енергоефективні технології та переходити на менш вуглецевоємні джерела енергії.

Концепція зеленого зростання передбачає можливість поєднання економічного розвитку зі зменшенням викидів парникових газів. Основними рушійними чинниками цього процесу виступають технологічні інновації, розвиток відновлюваної енергетики, підвищення ресурсної ефективності та інвестиції у стійку інфраструктуру.

На відміну від цього підходу, теорія дегросту (постзростання) ставить під сумнів можливість досягнення екологічної стійкості в умовах постійного економічного зростання. Прихильники цієї концепції вважають, що для ефективного вирішення кліматичних проблем необхідно скорочувати надмірне виробництво та споживання, змінювати економічні пріоритети та орієнтуватися на підвищення суспільного добробуту, а не лише на зростання валового внутрішнього продукту.

Важливим соціальним аспектом декарбонізації є концепція справедливого переходу, яка наголошує на необхідності врахування соціальних наслідків енергетичної трансформації. Вона передбачає підтримку працівників і регіонів, економіка яких залежить від викопного палива, через програми перекваліфікації, соціальний захист та інвестиції у розвиток нових галузей економіки.

Таблиця 1.5

<i>Онтологічний рівень</i>	<i>Визначення / Характеристика</i>	<i>Приклади / Прояви</i>	<i>Взаємодії та зворотні зв'язки</i>
<i>Матеріально-фізичний</i>	Пряме зменшення викидів вуглецю або вмісту вуглецю у паливі, промислових процесах або екосистемах	Електрифікація транспорту, уловлювання та зберігання вуглецю, використання відновлюваної енергії	Фізичні втручання залежать від технологічних можливостей та регуляторних стимулів; зменшення викидів впливає на екологічні та кліматичні результати

<i>Технологічно-процесуальний</i>	Інновації та методи, що дозволяють зменшити викиди вуглецю	Розумні мережі, виробництво зеленого водню, енергоефективне виробництво	Технологічні новації визначають економічну та соціальну досяжність; цикли інновацій реагують на політичні сигнали та попит ринку
<i>Економіко-структурний</i>	Перетворення економічних систем для зменшення вуглецевої інтенсивності, включаючи ринкові механізми та реструктуризацію промисловості	Встановлення ціни на вуглець, перехід до циркулярної економіки, розвиток низьковуглецевих секторів	Економічні стимули прискорюють впровадження технологій і впливають на соціальну поведінку; економічна доцільність визначає технологічну реалізацію
<i>Інституційно-правовий</i>	Кодифікація та регулювання цілей декарбонізації через закони, нормативи та міжнародні угоди	Зобов'язання за Паризькою угодою, система торгівлі викидами в ЄС, національні закони про клімат	Інституційні рамки створюють стимули та обмеження для технологічних і економічних рішень; правові норми впливають на соціальне впровадження
<i>Нормативно-соціальний</i>	Етичні, культурні та поведінкові аспекти, що визначають підтримку суспільством декарбонізації	Просвітницькі кампанії щодо сталого споживання, програми корпоративної екологічної відповідальності, ініціативи громад щодо відновлюваної енергії	Соціальні норми впливають на політичний тиск і попит споживачів; інституційні політики та економічні стимули підсилюють соціальну поведінку
<i>Епістемічно-дискурсивний</i>	Виробництво знань, комунікація та фреймінг декарбонізації, що формують сприйняття та дії	Наукові дослідження, медіа-дискурс, адвокаційна діяльність, освітні програми	Дискурсивне формування визначає соціальні пріоритети, інституційні стратегії та інвестиції; знання на основі доказів впливає на технології та політику

Джерело: складено автором

Таким чином, представлені у таблиці теоретичні підходи демонструють, що процес декарбонізації є багатовимірним явищем, яке охоплює економічні, технологічні, соціальні та інституційні аспекти трансформації сучасної економіки.

Декарбонізацію можна класифікувати за шістьма основними онтологічними рівнями, кожен з яких відображає різний аспект її системної реальності (табл.1.5).

1.3. Інституційно-економічні механізми стимулювання декарбонізації в умовах циркулярної економіки.

В глобальному економічному середовищі процеси декарбонізації трансформуються з окремих екологічних ініціатив у комплексну системну парадигму розвитку, що тісно інтегрується з принципами циркулярної економіки. Такий підхід передбачає не лише скорочення викидів парникових газів, а й глибоку перебудову виробничих і споживчих моделей через підвищення ресурсоефективності, впровадження замкнених виробничих циклів, розширення повторного використання матеріалів і мінімізацію утворення відходів. У цьому контексті декарбонізація виступає складовою ширшого процесу екологічної трансформації економіки, орієнтованої на досягнення довгострокової стійкості та зниження екологічного навантаження.

Реалізація зазначених трансформацій потребує формування цілісної системи інституційно-економічних механізмів, здатних забезпечити узгодженість дій на різних рівнях управління. Такі механізми поєднують регуляторні інструменти (екологічні стандарти, вуглецеве регулювання), ринкові стимули (ціноутворення на вуглець, торгівля квотами) та фінансові інструменти (зелене фінансування, інвестиційні програми), що у сукупності формують економічну мотивацію для переходу до низьковуглецевої моделі розвитку. Важливий також їхній інтегрований характер, який дозволяє одночасно впливати на виробничі процеси, інвестиційні рішення та поведінкові практики економічних агентів.



Рис. 1.5. Інституційно-економічна модель стимулювання декарбонізації в умовах циркулярної економіки

Джерело: складено автором

Рисунок 1.5. відображає інтегровану систему інституційно-економічних механізмів декарбонізації, яка включає регуляторні інструменти, ринкові стимули та фінансові механізми. Їх взаємодія формує комплексний вплив на виробничі процеси, інвестиційні рішення та поведінкові практики економічних агентів, що у підсумку забезпечує перехід до низьковуглецевої циркулярної економіки.

Інституційно-економічні механізми виступають ключовим елементом забезпечення ефективності декарбонізації, оскільки саме через них відбувається трансляція стратегічних кліматичних цілей у практичну площину економічної діяльності, що сприяє формуванню нової моделі циркулярного та кліматично нейтрального розвитку.

Регуляторні інструменти посідають центральне місце у системі інституційно-економічного забезпечення декарбонізації, оскільки саме через них держава та міжнародні інституції формують правила функціонування низьковуглецевої

економіки. Їх основне призначення полягає у створенні нормативного та економічного середовища, яке стимулює скорочення викидів парникових газів, розвиток чистих технологій та переорієнтацію інвестиційних потоків на екологічно стійкі види діяльності. У сучасних умовах регуляторні механізми дедалі більше інтегруються з принципами циркулярної економіки, що дозволяє поєднувати кліматичні цілі з підвищенням ресурсоефективності та мінімізацією відходів.

Одним із найбільш поширених інструментів виступає ціноутворення на вуглець, яке передбачає економічне стимулювання підприємств до скорочення викидів через встановлення вартості вуглецю. Найбільш розвиненою системою такого типу є Європейська система торгівлі викидами під назвою EU ETS, яка охоплює енергетичний сектор, промисловість, авіацію та морський транспорт. Система функціонує за принципом «cap-and-trade», коли встановлюється загальний ліміт викидів, а підприємства отримують або купують квоти, якими можуть торгувати на ринку. EU ETS охоплює близько 40–45 % усіх викидів Європейського Союзу та виступає ключовим інструментом досягнення кліматичних цілей ЄС [1].

Важливою тенденцією останніх років стало зростання ролі механізмів вуглецевого регулювання у глобальному масштабі. У 2024 році у світі функціонувало 75 систем ціноутворення на вуглець, які охоплювали близько 24 % глобальних викидів парникових газів, а сукупні доходи від таких механізмів перевищили 104 млрд дол. США. Більша частина цих коштів спрямовується на фінансування кліматичних та інфраструктурних програм [117].

Особливого значення у сучасній архітектурі кліматичного регулювання набуває механізм вуглецевого коригування імпорту – Carbon Border Adjustment Mechanism або СВАМ, який Європейський Союз почав впроваджувати у перехідному режимі з 2023 року. Основна мета СВАМ полягає у запобіганні «витоку вуглецю», тобто перенесенню виробництва до країн із менш жорсткими екологічними вимогами. Механізм передбачає застосування до імпортованої продукції вуглецевої вартості, еквівалентної тій, яку сплачують європейські

виробники в межах EU ETS. На першому етапі CBAM охоплює такі галузі, як металургія, цементна промисловість, виробництво алюмінію, добрив та електроенергії.

Регуляторні інструменти не обмежуються лише механізмами ціноутворення на вуглець. Важливу роль відіграють екологічні стандарти та нормативи, які визначають допустимі рівні викидів, вимоги до енергоефективності продукції та технологій, а також критерії сталого виробництва. У країнах ЄС такі стандарти інтегруються у промислову, транспортну та енергетичну політику, стимулюючи модернізацію виробництва та розвиток «зеленої» інфраструктури. Наприклад, Європейський зелений курс передбачає скорочення чистих викидів щонайменше на 55 % до 2030 року порівняно з рівнем 1990 року, що закріплено Європейським кліматичним законом.

Регуляторні механізми також дедалі активніше поєднуються з фінансовими інструментами та системами корпоративної звітності ESG, що формує нову модель екологічного управління. Компанії змушені враховувати кліматичні ризики у своїх стратегіях, а доступ до фінансування дедалі більше залежить від відповідності екологічним критеріям. Це створює додаткові стимули для інвестування у низьковуглецеві технології та прискорює процеси декарбонізації на глобальному рівні.

Ринкові стимули виступають одним із ключових економічних механізмів забезпечення декарбонізації, оскільки формують систему фінансової мотивації для скорочення викидів парникових газів та переходу до низьковуглецевих моделей виробництва і споживання. На відміну від суто адміністративного регулювання, ринкові інструменти базуються на економічній зацікавленості підприємств і споживачів у впровадженні екологічно ефективних технологій. Їхнє основне завдання полягає у внутрішньому врахуванні екологічних витрат у ринковій вартості продукції та послуг, що стимулює суб'єктів господарювання до зниження вуглецевої інтенсивності економіки.

Центральне місце серед ринкових стимулів займає механізм ціноутворення на вуглець, який реалізується через системи торгівлі викидами та вуглецеві податки. Економічна логіка такого підходу ґрунтується на тому, що викиди CO₂ отримують ринкову ціну, а отже підприємства зацікавлені у скороченні викидів для зменшення власних витрат. У результаті відбувається поступове перенаправлення капіталу у низьковуглецеві технології, відновлювану енергетику та енергоефективність.

Найбільш розвиненим прикладом функціонування ринкових стимулів є Європейська система торгівлі викидами, яка вважається найбільшим вуглецевим ринком у світі. Система охоплює близько 45 % викидів ЄС та регулює енергетику, промисловість, авіацію і частково морський транспорт. До 2024 року викиди секторів, охоплених EU ETS, скоротилися майже на 50 % порівняно з рівнем 2005 року, що свідчить про високу ефективність ринкового механізму у стимулюванні декарбонізації.

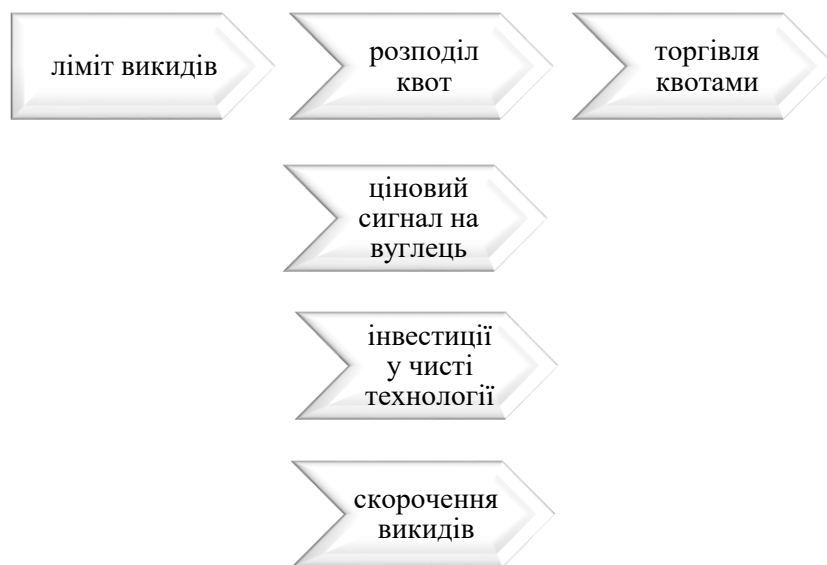


Рис 1.6. Механізм функціонування Європейської системи торгівлі викидами

Джерело: складено автором

Принцип функціонування ринкового механізму декарбонізації, заснований на встановленні ліміту викидів, розподілі квот та їх торгівлі (рис.1.6) показує, що формування ціни на вуглець стимулює інвестиції у чисті технології, це забезпечує поступове скорочення викидів парникових газів.

Важливим фактором впливу виступає динаміка ціни на вуглецеві квоти. Упродовж останніх років ціна дозволів EU ETS коливалася у межах 60-100 євро за тону CO_2 , що суттєво підвищило економічну привабливість відновлюваної енергетики та прискорило відмову від вугільної генерації в Європі. Високі ціни на вуглець стимулюють підприємства інвестувати у модернізацію виробництва, енергоефективність та низьковуглецеві технології, оскільки збереження високовуглецевих моделей стає економічно не вигідним.

У глобальному масштабі роль ринкових стимулів постійно зростає. У 2024–2025 рр. механізми ціноутворення на вуглець охоплювали близько 28 % світових викидів парникових газів, а загальні доходи від таких систем перевищили 100 млрд дол. США. Більша частина цих коштів спрямовується на фінансування екологічних програм, модернізацію інфраструктури та підтримку енергетичного переходу.

Ринкові стимули формують економічну основу сучасної моделі декарбонізації, забезпечуючи поєднання екологічних цілей із механізмами ринкової конкуренції. Їх ефективність проявляється у прискоренні інновацій, переорієнтації інвестиційних потоків та поступовій трансформації структури глобальної економіки у напрямі низьковуглецевого та циркулярного розвитку.

Фінансові механізми декарбонізації становлять одну з ключових складових інституційно-економічного забезпечення переходу до низьковуглецевої та циркулярної економіки. Їхнє основне призначення полягає у мобілізації капіталу для модернізації енергетики, розвитку відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності, впровадження чистих технологій та скорочення ресурсомісткості виробництва. На відміну від суто регуляторних інструментів, фінансові механізми забезпечують практичну ресурсну базу декарбонізації,

оскільки саме інвестиції визначають швидкість технологічного оновлення економіки.

Одним із провідних напрямів виступає «зелене» фінансування, яке охоплює зелені облігації, кліматичні фонди, пільгові кредити, гарантійні інструменти та спеціальні інвестиційні програми. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, у 2024 році глобальні інвестиції в енергетику мали перевищити 3 трлн дол. США, з яких близько 2 трлн дол. спрямовувалися саме на чисту енергетику, інфраструктуру та низьковуглецеві технології. Це свідчить про поступове зміщення інвестиційних потоків від викопного палива до відновлюваної енергетики, електромереж, систем накопичення енергії та енергоефективності [2].

Важливу роль відіграє ринок сталого боргу, зокрема зелені, соціальні, сталі та пов'язані зі сталим розвитком облігації. За даними Climate Bonds Initiative, у 2024 році обсяг узгоджених сталих боргових інструментів досяг 1,05 трлн дол. США, що стало рекордним показником, а кумулятивний обсяг таких інструментів сягнув 5,7 трлн дол. США. Зелені облігації залишаються основним сегментом цього ринку, оскільки їхні кошти спрямовуються на проекти відновлюваної енергетики, енергоефективності, чистого транспорту, модернізації будівель та управління відходами [3].

Кліматичні фонди та міжнародні фінансові інституції відіграють особливо важливу роль для країн, що розвиваються, та економік із високою потребою у модернізації. Світовий банк, ЄБРР, ЄІБ, Green Climate Fund та інші інституції фінансують проекти у сфері відновлюваної енергетики, енергоефективності, сталої інфраструктури та адаптації до кліматичних змін. У цьому контексті фінансові механізми виконують не лише інвестиційну, а й трансформаційну функцію, оскільки сприяють зміні структури економіки, розвитку нових ринків і зменшенню технологічної залежності від вуглецемістких секторів.

У таблиці 1.6 систематизовано роль міжнародних фінансових інституцій та кліматичних фондів у забезпеченні процесів глобальної декарбонізації. Їхня

діяльність охоплює фінансування відновлюваної енергетики, енергоефективності, сталої інфраструктури та адаптації до кліматичних змін, що особливо важливо для країн, які потребують структурної модернізації економіки.

Особливістю сучасних фінансових механізмів є їхній трансформаційний характер, оскільки вони не лише забезпечують інвестиційні ресурси, а й сприяють розвитку нових низьковуглецевих ринків, технологічному оновленню та поступовому скороченню залежності від вуглецемістких секторів. У результаті міжнародне кліматичне фінансування стає важливим інструментом формування стійкої циркулярної економіки.

Таблиця 1.6

Роль міжнародних фінансових інституцій та кліматичних фондів у підтримці декарбонізації

Інституція / фонд	Основні напрями фінансування	Приклади підтримки	Трансформаційний ефект
Світовий банк	Відновлювана енергетика, енергоефективність, адаптація до кліматичних змін	Фінансування модернізації енергетики, кліматичних програм та «зеленого» переходу в країнах, що розвиваються	Підвищення енергетичної стійкості та скорочення викидів
Європейський банк реконструкції та розвитку	«Зелені» інвестиції, модернізація інфраструктури, сталий транспорт	Інвестиції у ВДЕ, електротранспорт та декарбонізацію промисловості	Технологічне оновлення та розвиток низьковуглецевих секторів
Європейський інвестиційний банк	Кліматичні проекти, інновації, енергоефективність	Підтримка European Green Deal та енергетичного переходу	Формування довгострокової кліматичної інфраструктури
Зелений кліматичний фонд	Адаптація до кліматичних змін, розвиток ВДЕ, підтримка вразливих економік	Гранти та пільгове фінансування для країн із низьким рівнем доходу	Зменшення кліматичних ризиків та стимулювання сталого розвитку
Кліматичні інвестиційні фонди	Чисті технології, декарбонізація енергетики	Фінансування програм енергетичного переходу до чистих джерел енергії	Прискорення впровадження інноваційних технологій
Міжнародна фінансова корпорація	Приватні «зелені» інвестиції, ESG-проекти	Підтримка приватного сектору у сфері ВДЕ та сталого виробництва	Розвиток «зеленої» підприємницької екосистеми

Джерело: складено автором за [2-5]

Фінансові механізми декарбонізації формують матеріальну основу переходу до циркулярної економіки. Їх ефективність залежить від здатності поєднувати приватний капітал, державну підтримку, міжнародне фінансування та ринкові стимули. У стратегічному вимірі саме фінансові інструменти забезпечують перетворення кліматичних цілей на реальні інвестиційні проекти, що сприяють скороченню викидів, підвищенню ресурсоефективності та формуванню низьковуглецевої моделі розвитку.

Національні державні політики відіграють визначальну роль у практичній реалізації декарбонізаційних стратегій, оскільки саме на цьому рівні глобальні кліматичні цілі трансформуються у конкретні механізми економічного регулювання, інвестиційної підтримки та технологічної модернізації. Ефективність переходу до низьковуглецевої економіки значною мірою залежить від здатності урядів формувати узгоджену систему екологічної, енергетичної, промислової та інноваційної політики, адаптовану до структури національної економіки та рівня її технологічного розвитку.

Сучасні державні моделі декарбонізації охоплюють комплекс регуляторних та стимулюючих інструментів, серед яких особливе місце займають стандарти енергоефективності, державні програми підтримки чистої енергетики, податкові стимули для низьковуглецевих технологій та механізми екологічної модернізації промисловості. Наприклад, у Німеччині реалізується масштабна програма «Energiewende», спрямована на структурну перебудову енергетичного сектору, розвиток відновлюваних джерел енергії та поступову відмову від вугілля. Водночас Південна Корея у межах стратегії «Green New Deal» поєднує декарбонізацію з цифровою трансформацією економіки та розвитком інтелектуальної енергетичної інфраструктури.

Важливим елементом державної політики стає підтримка екологічних інновацій та створення нових ринків низьковуглецевих технологій. У багатьох країнах активно впроваджуються механізми державного стимулювання

виробництва акумуляторів, електротранспорту, водневих технологій та систем накопичення енергії. Наприклад, Японія реалізує довгострокову водневу стратегію, орієнтовану на розвиток водневої енергетики у транспортному та промисловому секторах, тоді як Китай поєднує державне планування з масштабною промисловою підтримкою виробництва сонячних панелей, акумуляторів та електромобілів.

Особливого значення у сучасних умовах набуває інтеграція принципів циркулярної економіки у систему державного регулювання. Це передбачає стимулювання повторного використання матеріалів, розвиток вторинних ринків сировини, впровадження моделей розширеної відповідальності виробника та підтримку екологічно безпечних виробничих практик. Такі підходи сприяють не лише скороченню викидів, а й підвищенню ресурсної безпеки та зниженню залежності економіки від імпорту критичних ресурсів.

Сучасна державна політика декарбонізації дедалі більше орієнтується на принципи «справедливого переходу», що передбачає мінімізацію соціальних ризиків структурної трансформації. У країнах ЄС реалізуються спеціальні програми підтримки регіонів, залежних від вугледобувної промисловості, включаючи перекваліфікацію працівників, стимулювання малого бізнесу та диверсифікацію локальної економіки. Це свідчить про те, що декарбонізація розглядається не лише як екологічний процес, а як комплексна модель економічної та соціальної модернізації.

Національні державні політики виступають ключовим механізмом координації декарбонізаційних процесів, поєднуючи регуляторні, інвестиційні та інноваційні інструменти. Їхня ефективність визначається здатністю забезпечувати баланс між екологічними цілями, економічною конкурентоспроможністю та соціальною стабільністю, формуючи основу для довгострокового переходу до низьковуглецевої циркулярної економіки.

У сучасній науковій та політичній дискусії процеси декарбонізації дедалі частіше розглядаються не лише як екологічна або технологічна трансформація, а як

комплексний соціально-економічний перехід, що безпосередньо впливає на структуру зайнятості, регіональний розвиток та рівень соціальної нерівності. У цьому контексті особливого значення набуває концепція «Just Transition» («справедливий зелений перехід»), яка передбачає забезпечення соціальної справедливості та мінімізацію негативних наслідків декарбонізації для працівників, домогосподарств і регіонів, залежних від вуглецемістких галузей.

Концепція справедливого переходу сформувалася як відповідь на ризики структурної трансформації економіки, пов'язаної зі скороченням використання викопного палива та закриттям традиційних промислових підприємств. Насамперед це стосується вугільної промисловості, металургії, важкої хімії та інших енергоємних секторів, де декарбонізація супроводжується втратою робочих місць, зниженням економічної активності окремих регіонів та зростанням соціальної напруги. За оцінками Міжнародної організації праці, глобальний перехід до низьковуглецевої економіки може призвести до втрати близько 6 млн робочих місць у традиційних секторах, однак одночасно створити понад 24 млн нових робочих місць у сфері чистої енергетики, енергоефективності, циркулярної економіки та екологічних послуг. Проблема полягає не лише у кількісній зміні зайнятості, а у необхідності забезпечення справедливого перерозподілу економічних вигод та мінімізації соціальних втрат.

Особливо гостро проблема справедливого переходу проявляється у вугільних регіонах, де економічна структура історично формувалася навколо видобутку викопного палива. Закриття шахт або скорочення виробництва у вуглецевоємних галузях може спричинити зростання безробіття, депопуляцію, погіршення соціальної інфраструктури та посилення регіональних диспропорцій. У зв'язку з цим декарбонізація потребує не лише екологічної модернізації, а й активної політики регіональної адаптації, що включає диверсифікацію економіки, стимулювання малого та середнього бізнесу, розвиток нових індустрій та створення альтернативних робочих місць.

Важливим інструментом реалізації концепції «Just Transition» у Європейському Союзі став Фонд справедливого переходу, створений у межах Європейського зеленого курсу. Основною метою фонду є підтримка регіонів, які найбільше залежать від вуглецевоємних галузей та стикаються з найбільшими соціально-економічними ризиками декарбонізації. Фонд фінансує програми перекваліфікації працівників, підтримку зайнятості, модернізацію місцевої економіки, розвиток інноваційних підприємств та екологічну реконструкцію територій. Упродовж 2021–2027 років обсяг фінансування Фонд справедливого переходу оцінюється приблизно у 55 млрд євро з урахуванням механізмів співфінансування.

Ключовим елементом справедливого переходу виступає перекваліфікація працівників та розвиток нових професійних компетенцій. Декарбонізація суттєво змінює структуру ринку праці, підвищуючи попит на фахівців у сферах відновлюваної енергетики, цифрових технологій, управління енергетичними системами, водневої енергетики та екологічного інжинірингу. У багатьох країнах реалізуються спеціальні освітні програми та системи «green skills», спрямовані на адаптацію робочої сили до нової моделі економіки. Таким чином, людський капітал стає одним із центральних факторів успішної декарбонізації.

Суттєвим викликом залишається також проблема соціальної нерівності, оскільки витрати енергетичного переходу часто непропорційно впливають на домогосподарства з низькими доходами. Зростання цін на енергію, вуглецеві податки та витрати на модернізацію житла можуть посилювати явище енергетичної бідності. У зв'язку з цим державна політика дедалі більше орієнтується на механізми соціальної компенсації, включаючи адресні субсидії, підтримку енергоефективності житла, компенсаційні виплати та програми соціального захисту.

У ширшому контексті концепція відображає перехід від вузького розуміння декарбонізації як технічного скорочення викидів до комплексної моделі соціально-

економічної трансформації. Її реалізація передбачає поєднання екологічних, економічних та соціальних цілей, що дозволяє забезпечити суспільну підтримку кліматичної політики та підвищити стійкість трансформаційних процесів. Саме тому справедливий перехід дедалі більше розглядається як один із фундаментальних принципів сучасної глобальної кліматичної політики та невід’ємний елемент формування низьковуглецевої циркулярної економіки.

Висновки до 1 розділу

Вивчення декарбонізації показує, що це багатогранна концепція, яка є центральною для розуміння сучасних зусиль щодо боротьби зі зміною клімату, досягнення сталого розвитку та трансформації сучасних індустріальних суспільств. Декарбонізація — це не просто технічний термін; вона охоплює процеси, системні зміни, нормативні цілі та навіть ширші цивілізаційні трансформації. Її значення з часом змінювалося, відображаючи переходи від вузьких промислових застосувань до складних соціально-екологічних, економічних та технологічних контекстів.

По суті, декарбонізація — це процес: вона передбачає систематичне скорочення викидів вуглецю шляхом змін у виробництві енергії, промисловій діяльності, транспорті та моделях споживання. Цей процес вимагає скоординованих дій протягом певного часу та не може бути досягнутий за допомогою ізольованих втручань. Якщо розглядати декарбонізацію як системну трансформацію, вона підкреслює необхідність реструктуризації економічних секторів, технологічної інфраструктури та соціальних практик для створення низьковуглецевого суспільства. Як нормативний ідеал, вона служить керівним принципом для розробки політики, заохочуючи уряди, установи та суспільства до досягнення амбітних кліматичних цілей та стратегій сталого розвитку. У ширшому масштабі декарбонізація являє собою цивілізаційний зсув, який кидає виклик існуючим

економічним моделям, споживчій поведінці та культурному ставленню до природи та технологій.

Ця концепція також діє на кількох функціональних рівнях. З екологічної точки зору, вона спрямована на пом'якшення наслідків зміни клімату та захист природних систем. З економічної точки зору, вона сприяє інноваціям, інвестиціям у зелені технології та переходу до стійких ринків. Технологічно, вона стимулює розвиток та впровадження відновлюваної енергії, енергоефективних рішень та систем управління викидами вуглецю. З юридичної та інституційної точки зору, вона вимагає структур управління, регуляторної політики та спільних міжнародних механізмів для координації дій на всіх рівнях. Разом ці рівні ілюструють, що декарбонізація є за своєю суттю міждисциплінарним та системним явищем.

Онтологічне розуміння декарбонізації підкреслює її фундаментальну природу: це одночасно реальний процес і концептуальна основа, яка пов'язує діяльність людини з екологічними результатами. Визнання цього дозволяє суспільствам планувати ефективніше, балансує між технологічним прогресом, економічним розвитком, соціальною справедливістю та екологічним управлінням.

Результати досліджень аідобрадені у працях [3, 4, 5, 6, 7]

2 РОЗДІЛ

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

2.1. Статистичне оцінювання показників декарбонізації в умовах глобальної циркулярної економіки.

Емпіричне дослідження базується на поєднанні методологічного інструментарію прикладної статистики та теоретичних положеннях циркулярної економіки, що забезпечує послідовний перехід від первинних даних до інтерпретації закономірностей декарбонізації. Статистичні методи застосовуються для систематизації, узагальнення та кількісного опису сукупності спостережень, а також для встановлення напрямку та сили статистичних зв'язків між показниками [1]. У межах такого підходу попередній аналіз даних виконує дві функції: забезпечує коректне узагальнення різномірної інформації та формує підґрунтя для подальшого кількісного аналізу взаємозв'язків у доступній сукупності спостережень.

Концепція циркулярної економіки задає змістові орієнтири емпіричного аналізу, трактуючи декарбонізацію як структурну трансформацію, спрямовану на ресурсоефективність, зниження матеріало- та енергоємності, розвиток повторного використання і перероблення та скорочення екологічного навантаження протягом життєвого циклу продуктів [2]. Таким чином, принципово важливим стає аналіз не лише абсолютних обсягів викидів, а й показників, що відображають інтенсивність викидів відносно економічного результату та навантаження у розрахунку на одну особу, оскільки саме вони фіксують зміст декарбонізації як зниження викидів на одиницю створеної вартості та як наслідок підвищення технологічної й організаційної ефективності.

Враховуючи вищезазначені теоретико-методологічні засади, емпірична частина організована як послідовна процедура, що мінімізує ризик некоректних зіставлень і водночас забезпечує порівнюваність висновків у межах наявних даних.

Для аналізу було використано дані, сформовані на основі відкритого завантаження Current Snapshot з бази Net Zero Tracker; база охоплює країни-учасниці Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату, регіони найбільших емітентів, міста з населенням понад 500 тис. осіб та найбільші компанії. Набір містить категоріальні характеристики кліматичних цілей і супровідні числові змінні, на основі яких обчислено викиди на одну особу та вуглецеву інтенсивність [3].

Першим кроком дослідження була фіксація структури даних за типами суб'єктів. На рис. 2.1 показано, що сукупність містить не лише країни, а й міста, регіони та компанії, причому чисельно домінують компанії (2087 записів), далі міста (1186), регіони (712) і країни (198).

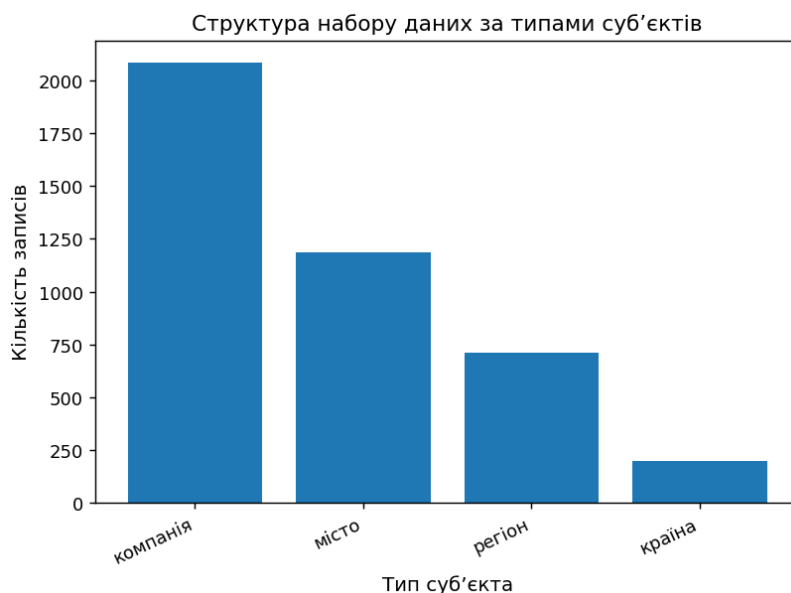


Рис. 2.1. Структура набору даних за типами суб'єктів

Джерело: побудовано автором

Така різноманітність одиниць спостереження є методично значущою: економічні та демографічні показники є порівнюваними насамперед для територіальних суб'єктів, тоді як для компаній вони не становлять універсальної основи зіставлення. Відтак попередній статистичний аналіз передбачає групування даних за типом суб'єкта та оцінювання повноти ключових змінних у кожній групі,

що відповідає вимогам статистичного узагальнення та забезпечення порівнюваності інформації [1].

На наступному кроці розглянуто поширеність довгострокової цілі нульових викидів у розрізі типів суб'єктів (рис. 2.2).

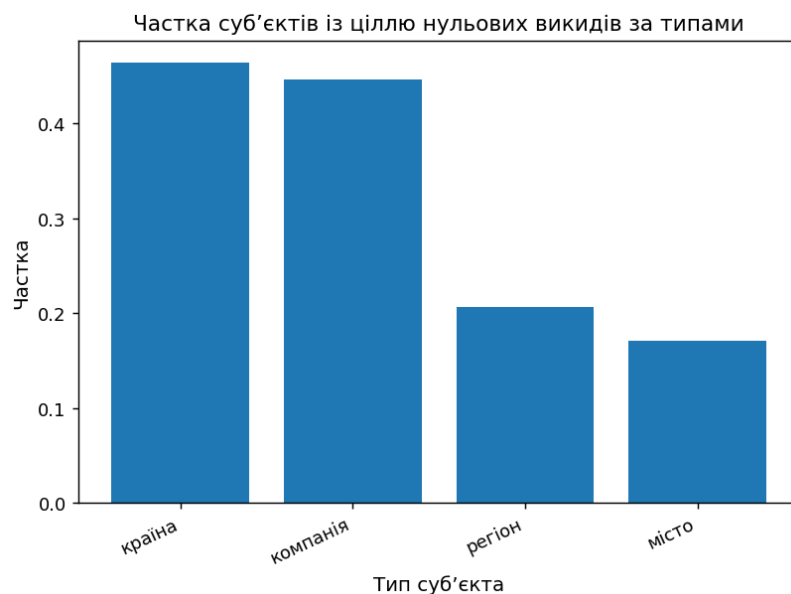


Рис. 2.2. Частка суб'єктів із ціллю нульових викидів за типами

Джерело: побудовано автором

Як видно з рис. 2.2, найбільша частка суб'єктів із ціллю нульових викидів припадає на країни (0,465; 92 із 198) та компанії (0,447; 933 із 2087). Для регіонів частка становить 0,206 (147 із 712), для міст – 0,171 (203 із 1186). Це свідчить про суттєву різницю у поширеності формалізованих кліматичних зобов'язань між рівнями управління та секторами: очевидно, на національному й корпоративному рівнях цільові декларації трапляються значно частіше, ніж на регіональному й міському.

Змістовне доповнення до цього спостереження дає аналіз років досягнення цілі. Розподіли на рис. А1–А4 (Додаток А) демонструють концентрацію років у діапазоні 2050 р., що відображає інституційну стандартизацію горизонту декарбонізації. Для компаній пік припадає на 2050 р. (634), помітно менші частоти мають 2040 рік (146) і 2030 рік (51), а також наявні поодинокі значення у 2060–2070 рр. Для країн домінування 2050 року ще виразніше: із 92 країн із ціллю нульових

викидів 75 вказують 2050 рік, 5 – 2060 рік, 4 – 2030 рік. Для міст і регіонів також фіксується пік у 2050 році, що створює підстави використовувати горизонт 2050 як базовий у сценарних розрахунках.

Окрім того, поряд із наявністю/відсутністю цілі важливим є її класифікація за типами. Рис. 2.3 та рис. Б1–Б4 (Додаток Б) підтверджують, що найпоширенішою категорією є «ціль нульових викидів» (933), тоді як «ціль відсутня» представлена 438 спостереженнями, «вуглецева нейтральність» – 303, «ціль зі скорочення викидів» – 250, «ціль щодо інтенсивності» – 42; інші типи трапляються суттєво рідше (наприклад, «кліматична нейтральність» – 31, «нульові викиди» – 14, «науково обґрунтована ціль» – 12, «нульовий вуглець» – 7, «ціль 1,5°C» – 5). Порівняння загального розподілу з розподілами у групах компаній, країн, міст і регіонів дозволяє інтерпретувати відмінності не лише за фактом наявності кліматичної цілі, а й за характером формулювання зобов'язання, що є важливим для аналізу політик декарбонізації у парадигмі циркулярної економіки [2].

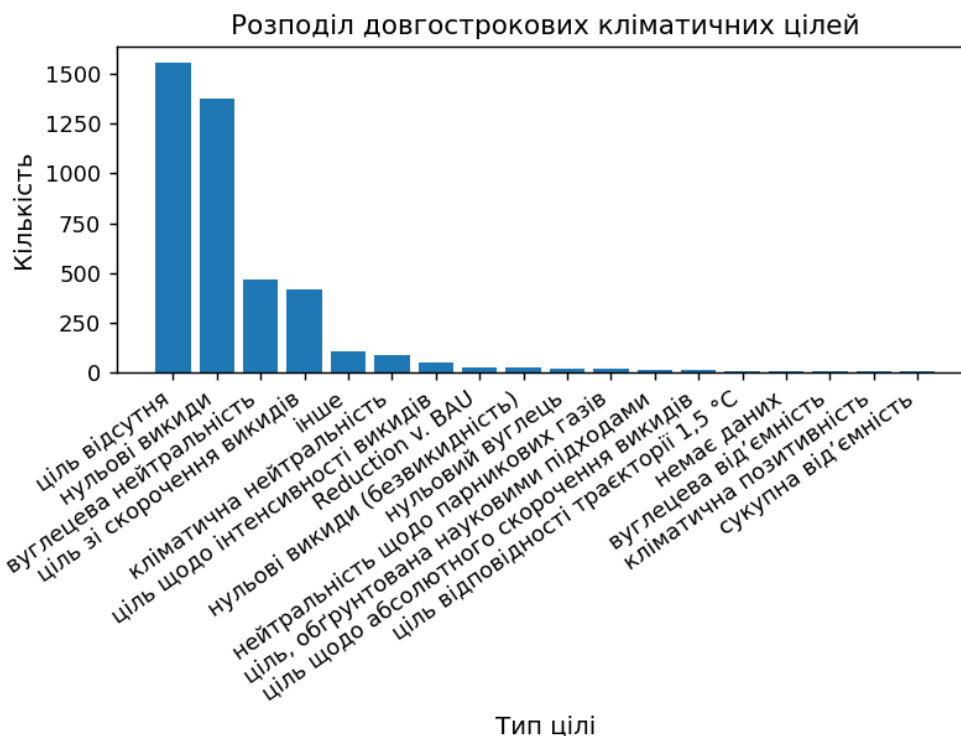


Рис. 2.3. Розподіл довгострокових кліматичних цілей (загалом)

Джерело: побудовано автором

У дослідженні основну увагу зосереджено на країнах як базовій одиниці порівняння, оскільки саме на національному рівні найчастіше формуються комплексні політики скорочення викидів, а доступні супровідні макропоказники дають змогу узгоджено інтерпретувати співвідношення між економічним розвитком і обсягами парникових газів.

Циркулярна модель передбачає не лише скорочення сукупних обсягів викидів, а й структурні зрушення у виробництві та споживанні через підвищення ефективності використання ресурсів, подовження строку служби продуктів, повторне використання та перероблення матеріалів [2]. У кількісному вимірі це означає потребу аналізувати не тільки абсолютні масштаби економіки й викидів, а й показники, що забезпечують зіставлення у відносних одиницях. Тому поряд із базовими змінними – валовим внутрішнім продуктом (ВВП) Y , чисельністю населення P та викидами E – доцільно формувати похідні індикатори: ВВП на одну особу $y = \frac{Y}{P}$ як узагальнену характеристику рівня економічного розвитку; викиди на одну особу $e = \frac{E}{P}$ як показник вуглецевого навантаження на населення; а також вуглецеву інтенсивність економіки $I = \frac{E}{Y}$, визначену як відношення викидів до ВВП, що відображає обсяг викидів на одиницю створеної вартості. Саме інтенсивність є принципово важливою для оцінювання декарбонізації, оскільки вона характеризує можливість економічного зростання за одночасного зменшення викидів на одиницю продукту, тобто пов'язана з технологічними та структурними змінами, притаманними циркулярній економіці [2]. Тоді сукупні викиди подаються як добуток трьох компонентів:

$$E = P \cdot y \cdot I. \quad (1)$$

У глобальному порівнянні абсолютні значення ВВП і викидів значною мірою відображають ефект масштабу: країни з більшою чисельністю населення або більшим економічним розміром, як правило, мають вищі значення як ВВП, так і сукупних викидів. За таких умов пряме зіставлення викидів і ВВП ризикує

зводиться до відображення розміру країни. Тому чисельність населення розглядається як необхідний чинник, що дає змогу відокремити масштабний ефект від співвідношень, релевантних для політик скорочення викидів. У цьому контексті подальший аналіз здійснюється у двох взаємодоповнювальних площинах: по-перше, оцінювання статистичного зв'язку між економічним масштабом і обсягами викидів з урахуванням чисельності населення; по-друге, аналіз залежності між рівнем добробуту (ВВП на одну особу) та вуглецевою інтенсивністю економіки як узагальненим показником вуглецевої ефективності.

Водночас пряме зіставлення ВВП та викидів у рівневих значеннях має суттєве обмеження: через значну різницю масштабів між країнами частина спостережень концентрується поблизу початку координат, тоді як декілька великих економік виділяються із загальної сукупності (рис. 2.4).

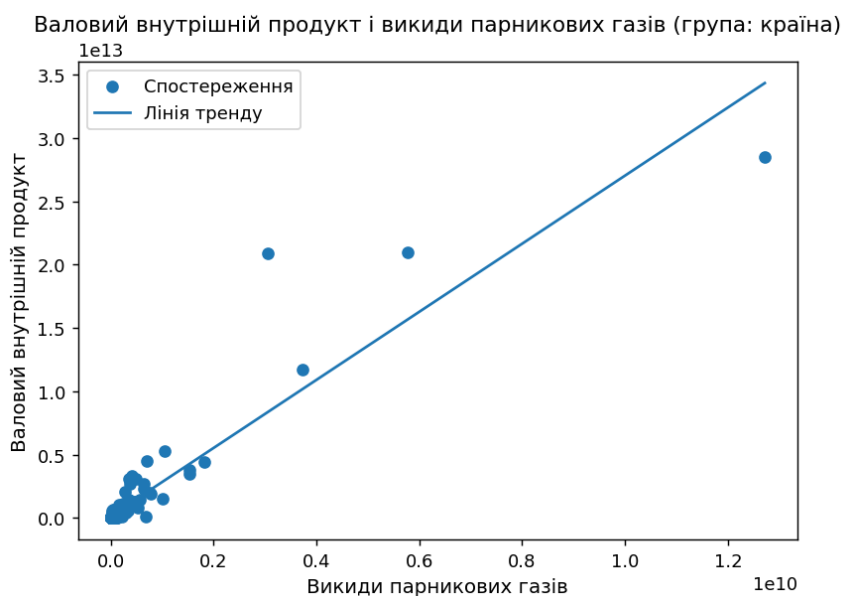


Рис. 2.4. ВВП і викиди парникових газів (група: країна)

Джерело: побудовано автором

З рис. 2.4 бачимо, що більшість країн утворюють щільний кластер за відносно малих значень, а поодинокі спостереження з дуже високими викидами і ВВП істотно впливають на нахил лінії тренду. За таких умов інтерпретація зв'язку у первинних одиницях вимірювання ускладнюється, а лінійна апроксимація

виявляється чутливою до крайніх значень, що є типовою ситуацією для макропоказників із асиметричними розподілами [1].

Для підвищення порівнюваності та коректності статистичного опису застосовано логарифмування змінних. Перехід до логарифмів виконує одночасно три функції: стискає масштаб і вирівнює вплив великих значень, зменшуючи домінування кількох найбільших економік у загальній картині; робить залежність більш близькою до лінійної, якщо фактичний зв'язок має степеневий характер; дає змогу трактувати нахил тренду як відносну чутливість, тобто зміна на певний відсоток у пояснювальній змінній відповідає приблизно сталому відсотковому зсуву в результативній змінній, що є зручним для міжкраїнних зіставлень [1]. Отже, прологарифмуємо обидві частини формули (1) за основою e ($e \approx 2,7$), отримаємо:

$$\ln E = \ln P + \ln y + \ln I. \quad (2)$$

Таким чином, у логарифмічній шкалі вплив демографічного масштабу $\ln P$, рівня добробуту $\ln y$ та вуглецевої інтенсивності $\ln I$ інтерпретується як внесок окремих складових у формування сукупних викидів.

На рис. 2.5 зображено логарифмічну форму зв'язку між ВВП і викидами. Як бачимо, точки формують виразну зростаючу залежність, а розсіювання навколо лінії тренду стає більш однорідним порівняно з рівневим зображенням.

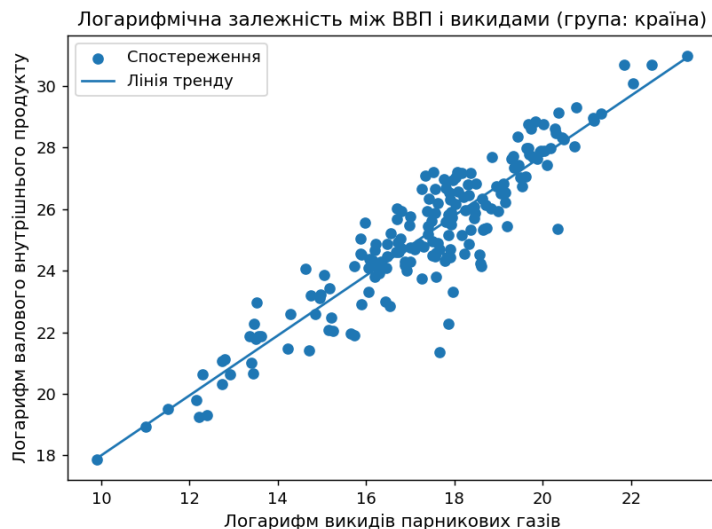


Рис. 2.5. Логарифмічна залежність між ВВП і викидами (група: країна)

Джерело: побудовано автором

Окрім того, також перевірено масштабний компонент через зв'язок між чисельністю населення та сукупними викидами (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Логарифмічна залежність між населенням і викидами (група: країна)

Джерело: побудовано автором

Рис. 2.6 демонструє очікувану позитивну залежність у логарифмічній шкалі, тобто зростання населення статистично узгоджується зі зростанням викидів, що підтверджує необхідність контролю демографічного чинника в міжкраїнних порівняннях. Іншими словами, без урахування населення зв'язок між викидами та ВВП значною мірою відображає ефект розміру країни, а не лише відмінності у структурі економіки чи технологічній ефективності.

Найбільш важливим для інтерпретації декарбонізації в контексті циркулярної економіки є співвідношення між рівнем добробуту та вуглецевою інтенсивністю (рис. 2.7).

Логарифмічна залежність між ВВП на одну особу та вуглецевою інтенсивністю (група: країна)

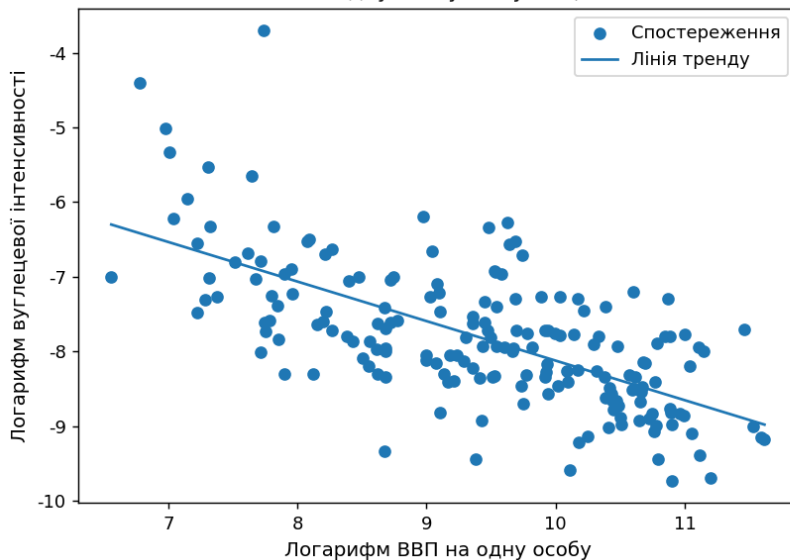


Рис. 2.7. Логарифмічна залежність між ВВП на одну особу та вуглецевою інтенсивністю (група: країна)

Джерело: побудовано автором

На рис. 2.7 наведено логарифмічну залежність між ВВП на одну особу та вуглецевою інтенсивністю (викиди/ВВП). Спостерігається спадний нахил тренду, тобто у середньому країни з вищим рівнем ВВП на одну особу мають нижчу інтенсивність викидів. Такий результат узгоджується з інтерпретацією декарбонізації як підвищення ресурсоефективності та зменшення викидів на одиницю створеної вартості, що є принципово релевантним у концепції циркулярної економіки [2].

З огляду на неоднорідність одиниць спостереження задачу формалізації взаємозв'язку між викидами, ВВП та населенням доцільно виконувати лише для територіальних суб'єктів – країн, міст і регіонів. Для компаній відповідні змінні в наявному файлі не формують узгоджений набір, так, показник вуглецевої інтенсивності не розраховується через відсутність одночасної наявності сукупних викидів і ВВП в записах цього типу. Отже, аналогічні графіки логарифмічних залежностей для міст і регіонів представлено в Додатку В (рис. В1–В8), оскільки вони відтворюють ті ж закономірності візуальної перевірки зв'язків та є допоміжними щодо базового міжкраїнного порівняння.

Для подальшого аналізу взаємозв'язку «викиди – ВВП – населення» доцільно зосередитися на територіальних суб'єктах – країнах, містах і регіонах, оскільки саме для них у наборі даних наявні узгоджені макропоказники, необхідні для обчислення похідних індикаторів (викиди на одну особу та вуглецева інтенсивність). Для компаній відповідні змінні представлені неповно й не утворюють порівнюваного набору, зокрема вуглецева інтенсивність $I = \frac{E}{Y}$ не може бути розрахована через відсутність одночасних значень викидів і ВВП у цій групі.

Оскільки концепція циркулярної економіки акцентує саме на зниженні викидів на одиницю економічного результату, подальше зіставлення фокусується на показнику вуглецевої інтенсивності. На рис. 2.8 наведено розподіли вуглецевої інтенсивності за типами територіальних суб'єктів.

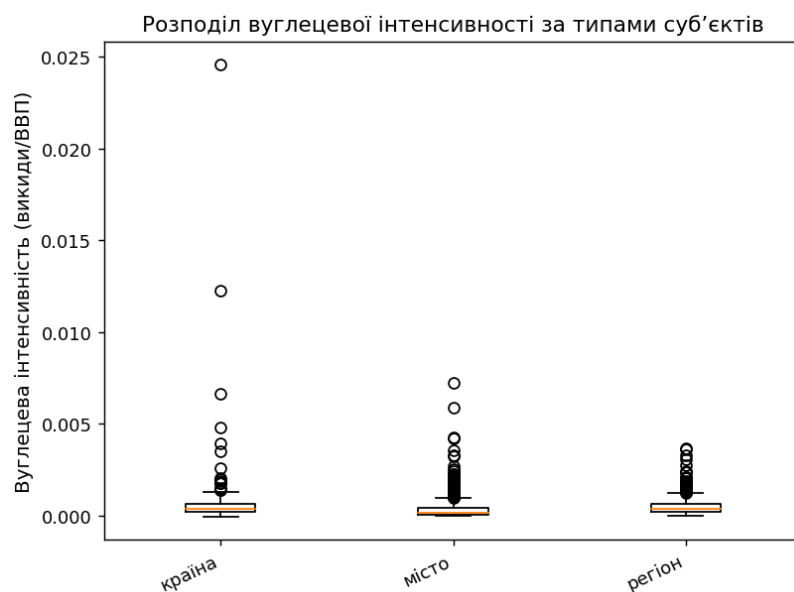


Рис. 2.8. Розподіл вуглецевої інтенсивності за типами суб'єктів

Джерело: побудовано автором

Як видно з рис. 2.8 у всіх групах домінують відносно малі значення інтенсивності, тоді як верхні значення формуються поодинокими спостереженнями з високим рівнем викидів на одиницю ВВП, що підтверджує правосторонню асиметрію й доцільність використання показників центральної тенденції та

розсіювання (медіана, кватили) у порівняльному аналізі. Зведені статистики за територіальними групами наведено на рис. 2.9.

	Показник	n	Середнє	Медіана	Q1	Q3
0	Вуглецева інтенсивність — компанія	0	NaN	NaN	NaN	NaN
1	Вуглецева інтенсивність — країна	185	0.000789	0.000369	0.000223	0.000680
2	Вуглецева інтенсивність — місто	772	0.000380	0.000165	0.000073	0.000445
3	Вуглецева інтенсивність — регіон	692	0.000501	0.000365	0.000218	0.000638

Рис. 2.9. Зведені характеристики розподілу вуглецевої інтенсивності між групами суб'єктів

Джерело: побудовано автором

Для країн ($n=185$) середнє значення вуглецевої інтенсивності дорівнює 0,000789, медіана – 0,000369, нижній кватиль – 0,000223, верхній кватиль – 0,000680. Для міст ($n=772$) середнє значення становить 0,000380, медіана – 0,000165, нижній кватиль – 0,000073, верхній кватиль – 0,000445. Для регіонів ($n=692$) середнє дорівнює 0,000501, медіана – 0,000365, нижній і верхній кватили відповідно – 0,000218 і 0,000638. Таким чином, у міських спостереженнях типовий рівень інтенсивності є нижчим, тоді як для країн і регіонів медіанні значення є близькими, що узгоджується з тим, що міста часто мають іншу структуру економічної активності порівняно з національним рівнем, а регіони можуть відображати концентрацію енергоємних видів діяльності.

Змістовно важливим є зіставлення інтенсивності у підгрупах країн залежно від наявності довгострокової цілі нульових викидів. На рис. 2.10 показано, що медіанні рівні та міжкватильні інтервали інтенсивності для країн із задекларованою ціллю та без неї частково перекриваються, однак група без цілі/з іншими цілями має більш виражену варіативність і більшу кількість високих значень. Це відповідає очікуванню, що формалізація довгострокових зобов'язань частіше пов'язана з орієнтацією на вищу вуглецеву ефективність, хоча сам по собі

факт наявності цілі у зрізових даних не є доказом причинного впливу та потребує подальшого регресійного аналізу з урахуванням масштабу та рівня розвитку.

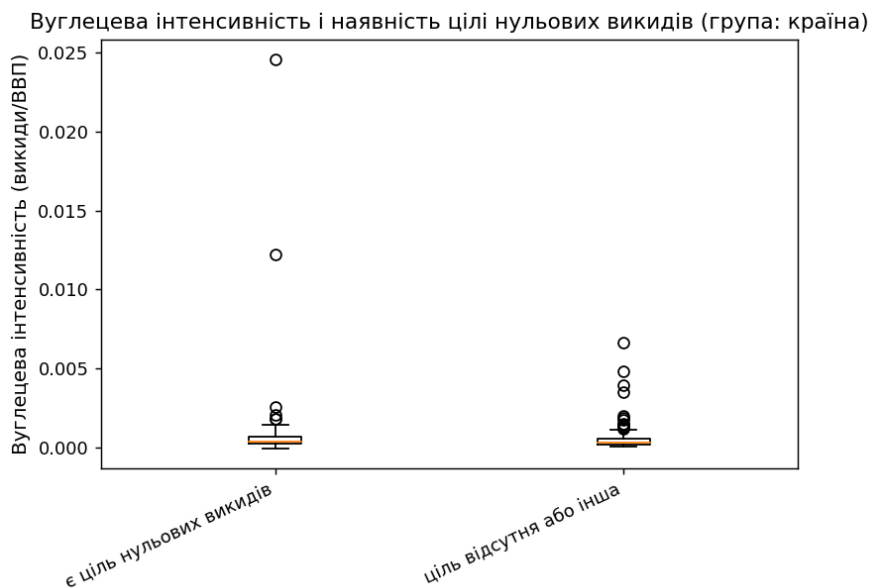


Рис. 2.10. Вуглецева інтенсивність і наявність цілі нульових викидів (група: країна)

Джерело: побудовано автором

Додатковий ракурс дає аналіз викидів у розрахунку на одну особу, який відображає безпосереднє вуглецеве навантаження на населення та доповнює показник інтенсивності (викиди/ВВП). На рис. 2.11 наведено коробчасті діаграми для двох підгруп країн – із наявною довгостроковою ціллю нульових викидів та без такої цілі (або з іншими типами цілей).

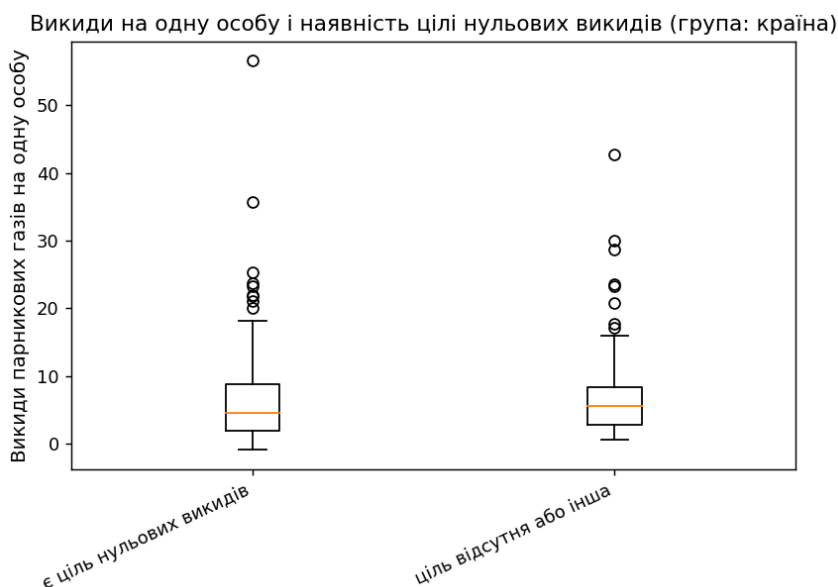


Рис. 2.11. Викиди парникових газів на одну особу та наявність цілі нульових викидів (група: країна)

Джерело: побудовано автором

З рис. 2.11 видно, що центральні значення (медіани) в обох підгрупах є близькими, а міжквартильні інтервали частково перекриваються. Водночас у підгрупі країн без цілі/з іншими цілями спостерігається ширший розкид і більша концентрація високих значень (верхні та поодинокі екстремальні спостереження), що може вказувати на наявність більшої частки країн із підвищеним вуглецевим навантаженням. Отже, на рівні описової статистики наявність довгострокової цілі узгоджується з більш стриманим профілем розподілу, однак для коректної інтерпретації необхідні подальші оцінки з урахуванням масштабу економіки, структури виробництва та рівня добробуту; у межах наявних даних це зіставлення слід трактувати як статистичну асоціацію, а не як причинний ефект.

Аналогічні порівняння для міст і регіонів (вуглецева інтенсивність та викиди на одну особу залежно від наявності/відсутності цілі нульових викидів) подано в Додатку Г (рис. Г1–Г4). У цих групах також спостерігається суттєве перекриття медіан і міжквартильних інтервалів між підгрупами з ціллю та без неї, що вказує на значну внутрішню неоднорідність суб'єктів за структурою економічної діяльності

та енергоспоживання. Водночас отримані графіки мають допоміжний характер: на субнаціональному рівні показники ВВП і викидів більш варіативні за методологією оцінювання та повнотою спостережень, тоді як міжкраїнні дані забезпечують найбільш узгоджену базу для інтерпретації зв'язків «добробут – вуглецева ефективність» у межах цього дослідження.

Окрім того, для аналізу вуглецевої інтенсивності додатково використано кумулятивні розподіли за типами суб'єктів (рис. 2.12).

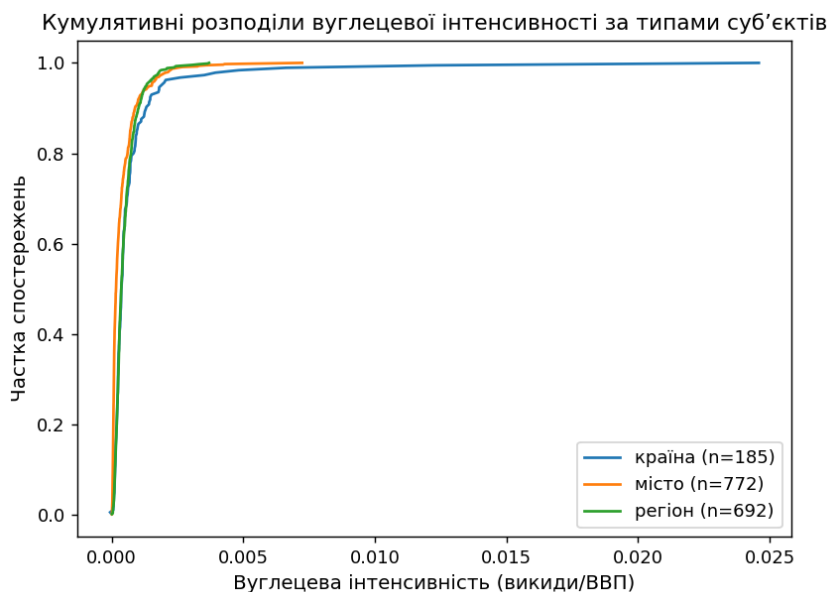


Рис. 2.12. Кумулятивні розподіли вуглецевої інтенсивності за типами суб'єктів

Джерело: побудовано автором

Рис. 2.12 демонструє, що основна маса спостережень у всіх територіальних групах зосереджена в низькому діапазоні значень, а відмінності між кривими формуються передусім за рахунок верхніх значень. Такий підхід є інформативним у ситуації, коли середні значення можуть бути нестійкими через крайні спостереження, а політично-економічні висновки значною мірою залежать від частки суб'єктів із підвищеною інтенсивністю.

Для дослідження взаємозв'язку між добробутом та вуглецевою ефективністю у розрізі наявності довгострокових зобов'язань розглянемо залежність між ВВП на

одну особу та вуглецевою інтенсивністю для країн (рис. 2.13), де маркерами розрізняються підгрупи з наявною ціллю нульових викидів та без неї/з іншими цілями.

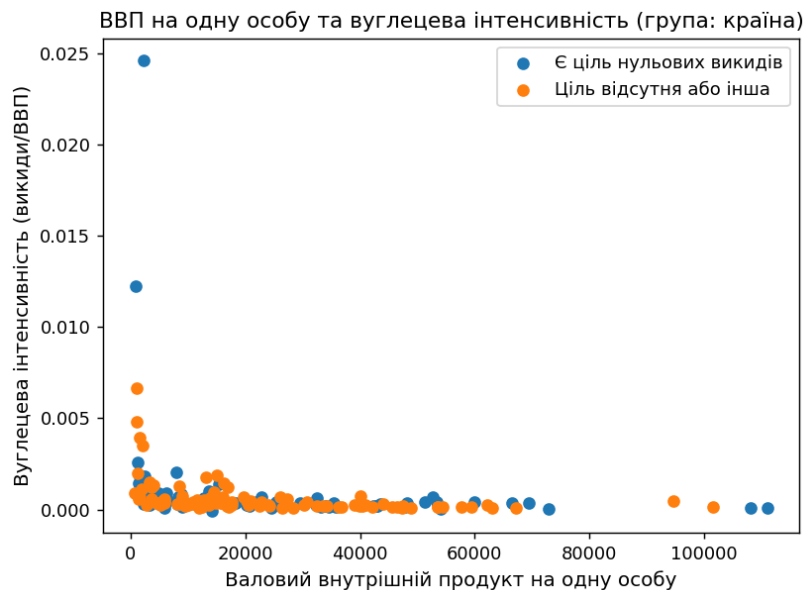


Рис. 2.13. ВВП на одну особу та вуглецева інтенсивність з поділом за наявністю цілі нульових викидів (група: країна)

Джерело: побудовано автором

На рис. 2.13 видно, що для обох підгруп (із ціллю нульових викидів та без неї/з іншими цілями) характерна спільна загальна тенденція: зі зростанням ВВП на одну особу вуглецева інтенсивність у середньому знижується. Водночас помітне суттєве перекриття хмар точок між підгрупами, особливо в зоні низьких і середніх рівнів доходу, де інтенсивність варіює у широких межах. Це означає, що сам факт наявності довгострокової цілі не вирівнює поточну вуглецеву ефективність, а різницю формують структурні характеристики економіки (частка промисловості та енергоємних секторів), паливно-енергетичний баланс, технологічний рівень, а також відмінності у стартових умовах і темпах модернізації.

Аналогічні діаграми розсіювання для міст і регіонів (рис. Д1–Д2, Додаток Д) підтверджують загальну ідею про спадання вуглецевої інтенсивності зі зростанням ВВП на одну особу, однак на субнаціональному рівні ця закономірність

проявляється менш однозначно через вищу внутрішньогрупову неоднорідність. Для міст характерна щільна концентрація спостережень у зоні відносно низької інтенсивності за широкого діапазону доходів, але водночас наявні численні нетипові спостереження з підвищеною інтенсивністю, переважно серед міст без цілі нульових викидів/з іншими цілями; це узгоджується з тим, що міські показники сильніше залежать від галузевої спеціалізації, структури енергопостачання та меж інвентаризації викидів. Для регіонів розсіювання також суттєве, зокрема при порівнянних рівнях ВВП на одну особу інтенсивність може відрізнитися в рази, що, ймовірно, відображає концентрацію енергоємних виробництв та особливості просторового розподілу промисловості. Отже, графіки для міст і регіонів доцільно розглядати як ілюстративне підтвердження наявності схожих напрямів зв'язків і значної варіативності, тоді як базовим рівнем залишаються країни, для яких макропоказники (ВВП, населення, викиди) представлені системно й є найбільш порівнюваними [3].

Окремий прикладний аспект дослідження полягає у побудові сценарних траєкторій обсягів викидів до 2050 року на основі задекларованих кліматичних цілей та наявних статистичних змінних. Узагальнені результати для групи країн зображено на рис. 2.14 у вигляді медіанної траєкторії та міжквартильного інтервалу, що дозволяє відобразити типову динаміку та ступінь невизначеності без домінування поодиноких крайніх траєкторій. Спадний профіль медіани узгоджується з логікою декарбонізації, тоді як ширина міжквартильного інтервалу відображає неоднорідність сценарних припущень і різні горизонти/шляхи досягнення довгострокових цілей у країнах.



Рис. 2.14. Сценарна траєкторія викидів: країна (медіана та міжквартильний інтервал)

Джерело: побудовано автором

Для забезпечення повноти прикладної частини сценарного аналізу аналогічні узагальнені траєкторії викидів було побудовано також для міст і регіонів (рис. Е1–Е2, Додаток Е) у форматі медіани та міжквартильного інтервалу. Для міст медіанна траєкторія має спадний профіль до 2050 року, що узгоджується з логікою декарбонізації, однак ширина міжквартильного інтервалу залишається значною майже на всьому горизонті, відображаючи високу неоднорідність міських цілей, відмінності у вихідних рівнях викидів і різні темпи потенційних змін у транспорті, будівлях та локальній енергетиці. Для регіонів характерним є різкіша зміна на початку горизонту та подальше більш плавне зниження медіани, тоді як інтервал невизначеності також залишається широким; це узгоджується з тим, що регіональні траєкторії сильніше залежать від концентрації енергоємних секторів та відмінностей у промисловій спеціалізації. Отже, сценарні графіки для міст і регіонів підтверджують загальну спрямованість на зниження викидів, але водночас підкреслюють істотну різномірність потенційних шляхів декарбонізації на

субнаціональних рівнях, що має враховуватися під час інтерпретації порівнянь і формування висновків.

Для детальнішого порівняння сформовано сценарні траєкторії для підгруп країн залежно від наявності цілі нульових викидів (рис. 2.15).

Сценарна траєкторія викидів у групі країн: поділ за наявністю цілі нульових викидів

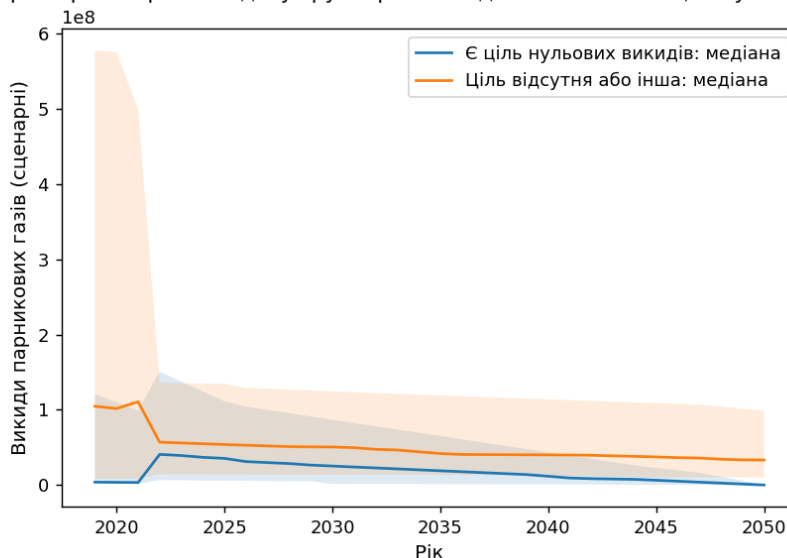


Рис. 2.15. Сценарна траєкторія викидів у групі країн: поділ за наявністю цілі нульових викидів

Джерело: побудовано автором

Розподіл на дві підгрупи дозволяє розглядати цілі як механізм групування за рівнем заявлених намірів: для країн із задекларованою ціллю очікуваним є більш виражене зниження викидів у довгостроковому горизонті, тоді як у групі без цілі/з іншими цілями траєкторія демонструє більш згладжену динаміку і характеризується ширшим діапазоном варіації. Водночас, з огляду на зрізову природу даних та нерівномірну повноту полів (відсоток скорочення, базовий рік), ці сценарні результати слід трактувати як узгоджене статистичне узагальнення доступної інформації, а не як прогноз у строгому часовому сенсі.

Аналогічний поділ сценарних траєкторій за наявністю цілі нульових викидів для міст і регіонів наведено в Додатку Е (рис. Е3–Е4). В обох випадках підгрупа з наявною ціллю демонструє нижчу медіанну траєкторію та більш виражене

зниження викидів у довгостроковому горизонті, тоді як у групі без цілі/з іншими цілями траєкторія характеризується нижчим темпом зміни і супроводжується ширшим діапазоном варіації. Однак перекриття інтервалів між підгрупами зберігається, що відображає неоднорідність початкових умов і різну повноту/деталізацію задекларованих цілей у емпіричних даних; тому ці графіки слід інтерпретувати як статистичне групування за рівнем заявлених намірів, а не як однозначне підтвердження ефекту самої наявності цілі.

Узагальнення емпіричних результатів засвідчує високу гетерогенність суб'єктів декарбонізації за типом та рівнем управління. Це ускладнює міжгрупову порівнюваність і вимагає аналітичного розмежування територіальних одиниць (країни/регіони/міста) та компаній; для останніх показники ВВП і чисельності населення не формують універсальної бази зіставлення, а отже прямі порівняння можуть змішувати ефекти масштабу та структурні відмінності.

Розповсюдженість довгострокових цілей нульових викидів є максимальною на національному та корпоративному рівнях і суттєво нижчою на рівні міст і регіонів. Такий градієнт узгоджується з інституційною логікою кліматичної політики: формалізація цілей, звітність і моніторинг потребують адміністративної спроможності, доступу до фінансування та координації політик, які в середньому є більш вираженими на рівні держав і великих корпорацій.

Вуглецева інтенсивність як показник вуглецевої ефективності має правосторонньо асиметричний розподіл у всіх територіальних групах; за таких умов інформативнішими є медіана та міжквартильний інтервал, оскільки вони слабше реагують на крайні спостереження, тоді як середнє значення є чутливим до поодиноких високих величин. Для міст типовий (медіанний) рівень інтенсивності є нижчим, тоді як для країн і регіонів медіанні значення є близькими, що вказує на подібність центральних характеристик розподілу за наявності відмінностей у поширеності високих рівнів інтенсивності.

2.2. Розвиток декарбонізації в Європі та Азії

Розгортання процесів декарбонізації в сучасній глобальній економіці характеризується чітко вираженою просторово-регіональною диференціацією, що формується під впливом нерівномірності соціально-економічного розвитку, відмінностей інституційного середовища, структури енергоспоживання, а також стратегічних пріоритетів державної політики. У цьому контексті декарбонізація постає не як уніфікований глобальний тренд, а як сукупність різноспрямованих траєкторій переходу до низьковуглецевої моделі господарювання, які адаптуються до національних і регіональних особливостей. Вагому роль відіграють також фактори доступу до фінансових ресурсів, рівень технологічного розвитку, ступінь інтеграції у світові ринки та участь у міжнародних кліматичних ініціативах.

Особливо репрезентативними для аналізу є європейський та азійський регіони, які демонструють принципово відмінні підходи до реалізації політики декарбонізації. Європа виступає прикладом інституційно узгодженої, нормативно орієнтованої моделі, де екологічні цілі інтегруються у всі сфери економічної політики, включаючи промисловість, енергетику та фінансовий сектор. Натомість країни Азії характеризуються більш гетерогенним і прагматичним підходом, у якому декарбонізаційні процеси поєднуються із завданнями забезпечення високих темпів економічного зростання, енергетичної безпеки та соціальної стабільності.

Європейський регіон посідає провідні позиції у сфері декарбонізації, що зумовлено комплексністю кліматичної політики, високим рівнем наднаціональної координації та розвиненістю інституційного середовища. На відміну від багатьох інших регіонів, у Європейському Союзі декарбонізація розглядається не як окремий напрям екологічної політики, а як системоутворюючий елемент довгострокової моделі економічного розвитку. Стратегічним ядром цієї трансформації є Європейський зелений курс, який визначає досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року як ключову ціль та інтегрує екологічні пріоритети у всі сфери економічної діяльності. Реалізація цієї стратегії передбачає використання широкого

спектра інструментів, серед яких особливе значення мають система торгівлі викидами, що створює ринкові стимули для скорочення викидів, механізм вуглецевого коригування імпорту, спрямований на запобігання «витоку вуглецю», а також комплекс політик, орієнтованих на розвиток відновлюваної енергетики та підвищення енергоефективності.

Європейська модель декарбонізації ґрунтується на синергії ринкових механізмів і жорсткого регуляторного впливу, що забезпечує одночасне досягнення екологічних та економічних цілей. Упродовж останніх років спостерігається стійка тенденція до зростання частки відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі ЄС, яка вже перевищує 22–25 %, тоді як у ряді країн-членів, зокрема у Швеції та Данії, цей показник перевищує 50 %. Паралельно відбувається структурна трансформація енергетичного сектору, що проявляється у поступовому скороченні використання викопного палива, насамперед вугілля, та переході до більш чистих джерел енергії. Важливим компонентом цієї трансформації є розвиток циркулярної економіки, яка передбачає підвищення ресурсоефективності, розширення практик повторного використання матеріалів і мінімізацію утворення відходів, що сприяє зниженню загального вуглецевого навантаження на економіку.

Специфікою європейського підходу є тісна інтеграція декарбонізаційних процесів із інноваційною та промисловою політикою. Європейський Союз активно інвестує у розвиток передових технологій, зокрема «зеленого» водню, систем накопичення енергії, електромобільності, а також цифрових рішень для моніторингу та управління викидами. Така технологічна модернізація не лише сприяє досягненню кліматичних цілей, але й формує нові конкурентні переваги європейської економіки на глобальному ринку. Водночас ЄС виступає активним суб'єктом формування міжнародних стандартів екологічного регулювання, які дедалі більше впливають на умови міжнародної торгівлі та виробничі практики партнерських країн. Через механізми екологічної сертифікації, вимоги до вуглецевого сліду продукції та регуляторні інструменти, такі як механізм

вуглецевого коригування імпорту, Європейський Союз фактично екстерналізує власну кліматичну політику, стимулюючи глобальне поширення принципів низьковуглецевого розвитку.

На відміну від європейської моделі, що вирізняється високим рівнем інституційної узгодженості та нормативної визначеності, країни Азії демонструють значно більш диференційований, багаторівневий і неоднорідний підхід до декарбонізації. Це зумовлено суттєвою асиметрією економічного розвитку, різною структурою енергетичних балансів, відмінностями у доступі до фінансових і технологічних ресурсів, а також пріоритетністю завдань економічного зростання і подолання бідності. Регіон поєднує як високорозвинені економіки з інноваційною орієнтацією (Японія, Південна Корея, Сінгапур), так і країни, що динамічно розвиваються (Китай, Індія, Індонезія, В'єтнам), для яких характерне швидке зростання промислового виробництва та урбанізації, що, своєю чергою, супроводжується істотним підвищенням енергоспоживання та обсягів викидів парникових газів. У таких умовах декарбонізація часто відбувається не як самодостатня ціль, а як складова більш широкої стратегії економічної модернізації.

Особливе місце у регіоні займає Китай, який, будучи найбільшим у світі емітентом CO₂, відіграє системоутворюючу роль у глобальній кліматичній динаміці. Декларовані цілі досягнення піку викидів до 2030 року та вуглецевої нейтральності до 2060 року визначають довгостроковий вектор трансформації китайської економіки. Для їх реалізації держава активно інвестує у розвиток відновлюваної енергетики, зокрема сонячної та вітрової, стимулює масштабне впровадження електротранспорту та розбудовує національну систему торгівлі викидами. Водночас збереження значної ролі вугілля в енергетичному балансі, обумовлене потребами енергетичної безпеки та стабільності постачання, створює структурні обмеження для прискорення процесів декарбонізації та вимагає поетапного характеру трансформації [108].

Індія, як одна з найбільш швидкозростаючих економік світу, також демонструє активізацію декарбонізаційних процесів, передусім через розвиток сонячної енергетики та підвищення енергоефективності. Проте залежність від викопного палива, насамперед вугілля, а також соціально-економічні виклики, пов'язані із забезпеченням доступу до енергії для значної частини населення, формують складний баланс між кліматичними зобов'язаннями та потребами економічного розвитку. У країнах Південно-Східної Азії декарбонізація перебуває на ранніх стадіях формування, що пояснюється обмеженістю інвестиційних ресурсів, недостатнім рівнем інституційної спроможності та високою залежністю від традиційних джерел енергії. Разом із тим у регіоні поступово зростає інтерес до розвитку відновлюваних джерел енергії та інтеграції принципів циркулярної економіки, що відкриває потенціал для подальшого екологічно орієнтованого зростання [109].

Японія та Південна Корея реалізують високотехнологічні стратегії декарбонізації, що базуються на інноваційному розвитку, цифровізації та активному впровадженні передових енергетичних рішень. Обидві країни задекларували досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року та спрямовують значні інвестиції у розвиток водневої енергетики, інтелектуальних енергомереж, систем накопичення енергії та екологічно чистих виробничих технологій. Їхній підхід відображає модель «технологічно керованої декарбонізації», у якій ключову роль відіграють інновації та підвищення ефективності використання ресурсів.

Процеси декарбонізації в сучасній економіці формуються під впливом комплексної взаємодії економічних, технологічних, політико-інституційних і соціальних чинників. Сукупна дія цих драйверів проявляється на різних рівнях – глобальному, регіональному та національному, визначаючи як інтенсивність, так і траєкторію переходу до низьковуглецевої моделі розвитку. Водночас специфіка їх впливу залежить від рівня економічної зрілості країн, структури енергетичних систем та ступеня інтеграції у світову економіку.

Одним з основних рушійних факторів є міжнародне управління кліматом, зокрема такі угоди, як Паризька угода, яка встановлює обов'язкові та необов'язкові зобов'язання щодо скорочення викидів. Ці угоди створюють основу для національної політики та заохочують країни до прийняття довгострокових стратегій декарбонізації [3, с. 80–85].

Економічні фактори також відіграють вирішальну роль. Зростання конкурентоспроможності технологій відновлюваної енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, значно прискорило зусилля з декарбонізації. У багатьох регіонах відновлювана енергія зараз дешевша за викопне паливо, що робить перехід економічно вигідним [6, с. 23–30]. Крім того, механізми ціноутворення на вуглець, включаючи системи торгівлі викидами та вуглецеві податки, забезпечують фінансові стимули для скорочення викидів та інвестування в чисті технології [7, с. 140–148].

Технологічні інновації є ще одним ключовим рушійним фактором. Досягнення в галузі зберігання енергії, виробництва водню та цифрових технологій підвищили доцільність та ефективність низьковуглецевих рішень. Швидкий розвиток електромобілів та інтелектуальних енергетичних систем ілюструє трансформаційний потенціал інновацій у досягненні цілей декарбонізації [8, с. 201–210].

Політичні та інституційні фактори однаково важливі. Уряди відіграють центральну роль у розробці та впровадженні політики, що підтримує декарбонізацію, включаючи субсидії на відновлювану енергетику, регулювання викидів та інвестиції в інфраструктуру. Досвід Європейського Союзу демонструє важливість скоординованих політичних рамок та довгострокового стратегічного планування [9, с. 95–102].

Соціальні фактори, включаючи обізнаність громадськості та зміну поведінки, також сприяють декарбонізації. Зростаюча стурбованість щодо зміни клімату призвела до змін у вподобаннях споживачів, таких як впровадження

екологічно чистих продуктів та способу життя. Більше того, соціальні рухи та екологічний активізм вплинули на політичні рішення та корпоративні стратегії [10, с. 60–68].

На процес декарбонізації впливають протидіючі сили, такі як залежність від викопного палива, економічні обмеження та політичний опір. Ці фактори створюють бар'єри, які необхідно подолати для забезпечення успішного переходу [11, с. 44–50].

У таблиці 2.1. окреслено порівняльну характеристику ключових рушійних сил декарбонізації в Європі та Азії, що дозволяє виявити відмінності у домінуючих факторах енергетичного переходу в обох регіонах. Зокрема, для Європи визначальним є високий рівень політичного регулювання та громадського тиску, що свідчить про інституційно орієнтовану модель декарбонізації, але в Азії ключову роль відіграють промисловий попит і технологічні інновації, що відображає економічно прагматичний підхід до зниження вуглецевих викидів. Спільними для обох регіонів залишаються значущість енергетичної безпеки та геополітичних факторів.

Таблиця 2.1.

Ключові рушійні сили декарбонізації (порівняльний вигляд)

Рушійна сила	Європа	Азія	Рівень впливу
Політичне регулювання	Дуже сильний	Помірний	Високий
Промисловий попит	Середній	Дуже сильний	Дуже високий
Технологічні інновації	Високий	Дуже високий	Дуже високий
Енергетична безпека	Високий	Високий	Високий
Громадський тиск	Дуже високий	Зростаючий	Середній
Геополітичні фактори	Високий	Дуже високий	Високий

Джерело: складено автором за [108], [110], [111]

Загалом таблиця 2.1. демонструє, що декарбонізація має багатовимірний характер, а її ефективність визначається поєднанням політичних, економічних і технологічних драйверів.

У сучасній науковій парадигмі декарбонізації дедалі більшої ваги набуває геополітичний чинник, який у ряді випадків виступає навіть потужнішим драйвером трансформацій, ніж суто екологічні імперативи. Це свідчить про те, що перехід до низьковуглецевої економіки дедалі більше визначається не лише потребою зменшення викидів парникових газів, а й стратегічними міркуваннями держав щодо зміцнення енергетичної безпеки, зниження залежності від імпорту енергоресурсів та посилення позицій у глобальній конкуренції. У Європі суттєве прискорення переходу до відновлюваних джерел енергії відбулося внаслідок кризових явищ у сфері енергопостачання та зростання геополітичних ризиків, що актуалізувало необхідність диверсифікації енергетичних джерел і скорочення залежності від зовнішніх постачальників. У цьому контексті декарбонізація набула не лише екологічного, але й безпекового виміру, інтегруючись у ширшу стратегію економічної та політичної стійкості. Аналогічні тенденції простежуються і в країнах Азії, де активне інвестування у відновлювану енергетику, розвиток водневих технологій та електрифікацію транспорту значною мірою зумовлені прагненням досягнення енергетичної незалежності та зниження вразливості до коливань світових енергетичних ринків. У цьому випадку екологічні цілі поєднуються з прагматичними економічними та геополітичними інтересами, що визначає специфіку азійської моделі декарбонізації.

Таблиця 2.2. відображає динаміку глобального нарощування потужностей відновлюваної енергетики у 2010–2024 рр. у розрізі ключових регіонів, що дозволяє оцінити як масштаби, так і інтенсивність енергетичної трансформації. Представлені дані свідчать про загальносвітову тенденцію стрімкого зростання «зеленої» генерації, яка є одним із базових інструментів декарбонізації економіки.

Найбільш значні як абсолютні, так і відносні темпи зростання демонструє Китай, де встановлені потужності зросли з 290 ГВт до 2100 ГВт, що відповідає приросту понад 600 %. Це підтверджує його роль глобального лідера у розвитку відновлюваної енергетики та ключового драйвера світової декарбонізації. Високі темпи зростання також характерні для країн Південно-Східної Азії (+566 %) та Індії (+422 %), що свідчить про активну фазу енергетичного переходу в економіках, які швидко розвиваються [112].

Європа, хоча й демонструє більш помірні темпи приросту (+185 %), зберігає стабільно високі обсяги встановлених потужностей та виступає одним із найбільш зрілих і технологічно розвинених ринків відновлюваної енергетики. Це вказує на те, що європейський регіон перебуває на більш просунутій стадії енергетичної трансформації, де темпи зростання поступово стабілізуються, але зберігається стратегічна орієнтація на декарбонізацію [110].

Таблиця 2.2.

Глобальне зростання відновлюваної енергетики (2010–2024)

Регіон	2010 Потужність (ГВт)	2024 Потужність (ГВт)	Темпи зростання
Європа	312 ГВт	890 ГВт	+185%
Китай	290 ГВт	2100 ГВт	+624%
Індія	45 ГВт	235 ГВт	+422%
Південно-Східна Азія	18 ГВт	120 ГВт	+566%

Джерело: складено автором за [110], [112], [113]

Прослідковано зміщення центрів зростання відновлюваної енергетики у бік Азії, що зумовлено як високими темпами економічного розвитку, так і необхідністю забезпечення енергетичної безпеки, підтверджено глобальний характер переходу до низьковуглецевої енергетики, який охоплює як розвинені економіки, так і ті, що розвиваються.

В ряді азійських країн простежується так званий «парадокс зеленого зростання», що відображає внутрішню суперечність між екологічними цілями та економічною динамікою. З одного боку, ці економіки демонструють суттєві успіхи

у розвитку відновлюваної енергетики, зокрема через активне нарощування потужностей сонячної та вітрової генерації. З іншого боку, паралельно спостерігається зростання загального споживання енергії, яке значною мірою задовольняється за рахунок викопних видів палива.

У результаті формується специфічна модель «подвійної енергетичної системи», в межах якої відновлювані джерела енергії не стільки заміщують традиційні, скільки доповнюють їх, забезпечуючи покриття зростаючого попиту на енергію. Така ситуація свідчить про те, що темпи економічного розвитку та індустріалізації випереджають швидкість енергетичної трансформації, що ускладнює досягнення цілей декарбонізації та потребує більш глибоких структурних змін у енергетичних і виробничих системах.

Європейський Союз розробив унікальну інтегровану архітектуру управління кліматом, яка поєднує обов'язкове законодавство, економічні стимули та багаторівневу координацію між наднаціональними інституціями та державами-членами. На відміну від багатьох інших глобальних гравців, ЄС впровадив декарбонізацію не лише в екологічну політику, але й в економічну, промислову, торговельну та соціальну сфери політики, зробивши її міжгалузевим порядком денним трансформації, а не вузькою екологічною ініціативою.

Фундаментальний зсув відбувся з прийняттям Європейської зеленої угоди, яка переосмислила кліматичну політику як стратегію зростання, спрямовану на досягнення кліматично нейтральної та ресурсоефективної економіки до 2050 року [1, с. 34–45]. Цей підхід запровадив концепцію «сталі конкурентоспроможності», пов'язуючи кліматичні цілі з промисловими інноваціями, енергетичною безпекою та трансформацією ринку праці.

Важливим кроком є посилення юридично обов'язкових зобов'язань згідно з Європейським кліматичним законом, який перетворює політичні зобов'язання на цілі, що підлягають виконанню. Ця правова база зобов'язує держави-члени

узгоджувати національну політику з вуглецевими бюджетами ЄС, ефективно інтегруючи управління кліматом у національне економічне планування.

Одним із найпотужніших регуляторних інструментів залишається Система торгівлі викидами ЄС (EU ETS). З часом ETS перетворилася з відносно слабкого механізму обмеження та торгівлі квотами на надійний інструмент ціноутворення на вуглець завдяки поступовому посиленню обмежень викидів та скороченню безкоштовних квот. Ціни на вуглець значно зросли за останні роки, створюючи потужні економічні сигнали для промисловості щодо переходу на низьковуглецеві технології [2, с. 112–118].

ЄС також розширив свій політичний інструментарій, запровадивши коригування викидів на кордоні (СВАМ), що є важливою інновацією в міжнародному управлінні кліматом. СВАМ має на меті запобігти «витоку вуглецю», забезпечуючи, щоб імпортовані товари відображали порівнянні витрати на вуглець з товарами, виробленими в ЄС. Цей механізм не лише зміцнює екологічну цілісність, але й змінює глобальні торговельні відносини, враховуючи витрати на вуглець у ланцюгах поставок [3, с. 56–63].

Паралельно, фінансове управління стало наріжним каменем кліматичної політики ЄС. Такі інструменти, як Інноваційний фонд та програма «Горизонт Європа», все більше орієнтовані на проривні технології, включаючи зелений водень, уловлювання вуглецю та системи відновлюваної енергії наступного покоління. Механізм справедливого переходу є особливо важливим, оскільки він визнає нерівномірний розподіл витрат на декарбонізацію та прагне пом'якшити соціальну нерівність, спричинену реструктуризацією промисловості [4, с. 89–97].

Загалом, політична основа ЄС відображає перехід від фрагментарного регулювання навколишнього середовища до інтегрованої «моделі управління кліматично-економічною системою», де декарбонізація розглядається як структурна трансформація всієї економіки.

У таблиці 2.3. узагальнено ключові кількісні параметри кліматичної політики Європейського Союзу та відображено як досягнуті результати, так і стратегічні орієнтири декарбонізації. Наведені показники свідчать про суттєвий прогрес ЄС у скороченні викидів парникових газів, які вже зменшилися майже на 40% порівняно з рівнем 1990 року, а також про амбітність цілей подальшого скорочення до 2030 року та досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Значна увага приділяється фінансовому забезпеченню кліматичної трансформації, що підтверджується масштабними інвестиціями в межах Європейського зеленого курсу, програмою Horizon Europe та Фондом справедливого переходу.

Таблиця 2.3.

Ключові статистичні показники кліматичної політики ЄС

Показник	Значення	Період / Примітка
Скорочення викидів ПГ ЄС	37–38%	від рівня 1990 року (станом на 2023–2024 рр.)
Ціль скорочення викидів до 2030 р.	–55%	від рівня 1990 року
Кліматична нейтральність	2050 рік	юридично закріплена Європейським кліматичним законом
Частка енергетичного сектору у викидах ЄС	≈75%	загальні викиди ПГ
Частка відновлюваної енергетики	24–25%	2023–2024 рр.
Щорічне необхідне скорочення викидів	4,6–5%	для досягнення цілей 2030
Частка викидів, охоплених EU ETS	40%	загальних викидів ЄС
Ціна вуглецю EU ETS	90–100 євро/т CO ₂ (пік)	2023 рік
Частка промислових викидів у секторах СВМ	>50%	цемент, сталь, алюміній тощо
Інвестиції Green Deal	1 трлн євро	на 2021–2030 рр.
Бюджет Horizon Europe	95,5 млрд євро	2021–2027 рр.
Фонд справедливого переходу	55 млрд євро	підтримка регіонів трансформації
Частка зайнятості у вугільних регіонах	2–5%	залежно від регіону

Джерело: складено автором за [112], [114], [115], [116], [117]

Кліматична політика Європейського Союзу характеризується поєднанням жорсткого регуляторного тиску, масштабного фінансування та ринкових механізмів (зокрема EU ETS і СВМ). Це формує одну з найбільш комплексних

систем декарбонізації у світі, де ключову роль успішно інтегрує економічні стимули та нормативне регулювання.

Процес декарбонізації в Європі характеризується специфічними для секторів шляхами трансформації, кожен з яких має різні рівні технологічної зрілості, інвестиційні потреби та політичні виклики.

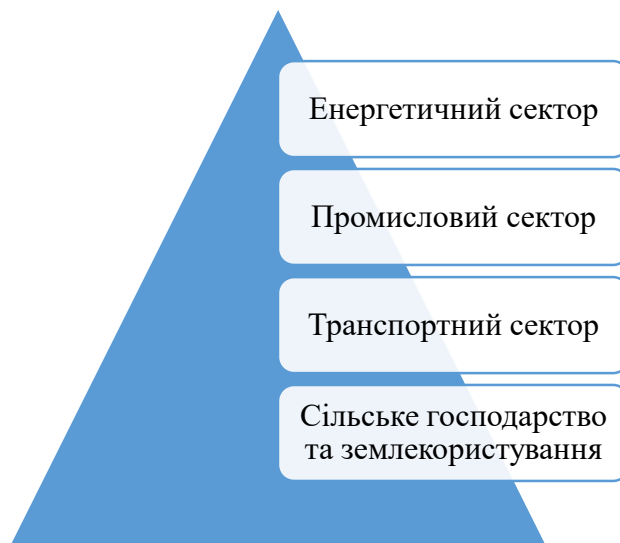


Рис. 2.16. Секторальна структура декарбонізації економіки

Джерело: побудовано автором

На рисунку 2.16. представлено ключові сектори економіки, що формують основу процесів декарбонізації, а саме: енергетичний, промисловий, транспортний та сектор сільського господарства і землекористування. Структура відображає комплексний та міжсекторальний характер переходу до низьковуглецевої економіки, де кожен із секторів відіграє специфічну роль у формуванні загального рівня викидів парникових газів.

Енергетичний сектор виступає базовим, оскільки є основним джерелом викидів та водночас ключовим об'єктом трансформації через розвиток відновлюваних джерел енергії. Енергетичний сектор являє собою найпросунутіший етап декарбонізації в Європі. Впродовж останнього десятиліття ЄС зазнав структурного зсуву від викопного палива до відновлюваних джерел енергії. Вітрова

та сонячна енергія стали домінуючими джерелами нових потужностей для виробництва електроенергії, тоді як вугілля зазнало постійного структурного спаду.

Важливою тенденцією є поява децентралізованих енергетичних систем, де домогосподарства та малі підприємства все частіше беруть участь у виробництві електроенергії за допомогою сонячних панелей на дахах та місцевих енергетичних спільнот. Це являє собою фундаментальний зсув від централізованих систем на основі викопного палива до розподілених мереж відновлюваних джерел енергії.

Крім того, офшорна вітроенергетика, особливо в регіоні Північного моря, стала стратегічним стовпом європейської енергетичної політики. Такі країни, як Данія та Нідерланди, розробляють великомасштабні «енергетичні острови», які інтегрують вітрогенерацію, виробництво водню та транскордонні мережі розподілу електроенергії [5, с. 21–29].

Наведені у таблиці 2.4. показники свідчать про суттєвий прогрес у декарбонізації енергетики, яка традиційно є найбільшим джерелом викидів парникових газів.

Зокрема, частка відновлюваної електроенергії у 2023–2024 рр. досягла рівня 44–46 %, що підтверджує домінування «зеленої» генерації у структурі енергоспоживання. Важливим індикатором структурних змін є різке скорочення використання вугілля – на 65 % порівняно з 2010 роком, що відображає відмову від найбільш вуглецемісткого виду палива. Водночас понад 80 % нових генеруючих потужностей припадає на вітрову та сонячну енергетику, що свідчить про стратегічну орієнтацію ЄС на розвиток відновлюваних джерел енергії як основи майбутньої енергосистеми.

Позитивна динаміка також простежується у скороченні викидів CO₂ в енергетичному секторі, які зменшилися на 45 % від рівня 1990 року. Це є результатом поєднання технологічної модернізації, регуляторної політики та ринкових стимулів. Значні обсяги інвестицій у відновлювану енергетику, що

перевищують 100 млрд євро щорічно, підтверджують фінансову спроможність і довгострокову зацікавленість ЄС у розвитку чистої енергетики.

Таблиця 2.4.

Ключові показники трансформації енергетичного сектору ЄС

Показник	Значення	Період / Примітка
Частка відновлюваної електроенергії	44–46%	2023–2024 рр.
Зменшення використання вугілля	–65%	від 2010 р.
Частка вітрової та сонячної енергії в нових потужностях	> 80%	нові встановлення
Скорочення викидів CO ₂ в енергетиці	–45%	від 1990 р.
Інвестиції у ВДЕ	> 100 млрд євро/рік	середнє значення

Джерело: складено автором за [115], [116], [117]

Трансформація енергетичного сектору Європейського Союзу характеризується швидким переходом від викопних джерел енергії до відновлених, при цьому найбільш динамічне зростання демонструють генерацію сонячного та вітрового середовища. Одночасно всі структурні скорочення вугільної генерації, що є ключовим фактором декарбонізації енергетики.

Промисловий сектор залишається одним із найбільш складних сегментів у контексті декарбонізації, що зумовлено його високою енергоємністю, технологічною інерційністю та значною залежністю від викопних видів палива у виробничих процесах. Найбільш проблемними з точки зору скорочення викидів є так звані «важкі» галузі – металургія, цементна, хімічна та нафтопереробна промисловість, на які припадає значна частка промислових викидів CO₂. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, промисловий сектор генерує близько 25–30 % глобальних викидів парникових газів, що підкреслює його ключову роль у досягненні кліматичних цілей.

Особливого значення набувають інноваційні технології, спрямовані на глибоку трансформацію виробничих процесів. Одним із найбільш перспективних напрямів є виробництво сталі із застосуванням «зеленого» водню, який використовується у процесах прямого відновлення заліза як альтернатива

коксівному вугіллю. Такий підхід дозволяє потенційно скоротити викиди у сталеливарній промисловості до 90 %. Високі капітальні витрати та потреба у значних обсягах дешевої відновлюваної електроенергії стримують широкомасштабне впровадження цієї технології, хоча в ЄС уже реалізуються пілотні проекти (зокрема HYBRIT у Швеції) [119].

Паралельно з технологічною модернізацією активізується впровадження принципів циркулярної економіки, які передбачають зменшення первинного видобутку ресурсів за рахунок підвищення рівня переробки, оптимізації матеріальних потоків та подовження життєвого циклу продукції. За даними Європейської комісії, підвищення ресурсоефективності може забезпечити скорочення промислових викидів у ЄС до 20–25 % у середньостроковій перспективі, одночасно знижуючи залежність від імпорту сировини та підвищуючи економічну стійкість [115].

Важливим доповненням до цих підходів є розвиток технологій уловлювання, використання та зберігання вуглецю (CCUS), які набувають дедалі більшого значення для галузей із так званими «процесними» викидами, зокрема цементної та хімічної промисловості. Для досягнення сценарію глобальної кліматичної нейтральності до 2050 року обсяги уловлювання CO₂ мають зрости з менш ніж 50 млн тонн на рік сьогодні до понад 1,2 млрд тонн до 2030 року. Це свідчить про стратегічну роль CCUS як перехідної технології, що дозволяє суттєво скоротити викиди там, де повна відмова від вуглецевих процесів наразі є технологічно або економічно обмеженою [120].

Таблиця 2.5. відображає структуру викидів у промисловому секторі ЄС за основними підсекторами, що дозволяє ідентифікувати найбільш вуглецемісткі галузі. Найбільшу частку формує хімічна промисловість (30 %), за нею – металургія (25 %) та цементна галузь (20 %), що свідчить про домінування енергоємних і технологічно складних виробництв. Представлена структура підкреслює

необхідність диференційованих підходів до декарбонізації, з урахуванням специфіки джерел викидів у кожному підсекторі.

Таблиця 2.5.

Структура викидів промислового сектору ЄС

Підсектор	Частка в промислових викидах	Основні джерела
Металургія (сталь)	25%	кокс, доменні печі
Цементна промисловість	20%	процесні викиди CO ₂
Хімічна промисловість	30%	нафта, газ, технологічні процеси
Інші галузі	25%	змішане споживання

Джерело: складено автором за [119], [120]

Декарбонізація промислового сектору потребує поєднання кількох взаємодоповнювальних підходів – технологічних інновацій, розвитку циркулярної економіки та впровадження механізмів уловлювання вуглецю. Комплексність і капіталомісткість цих трансформацій визначають їх тривалий характер, але водночас формують основу для досягнення довгострокових кліматичних цілей та підвищення конкурентоспроможності економік у глобальному середовищі.

Транспортний сектор у сучасних умовах перебуває на етапі глибокої структурної трансформації, що зумовлена поєднанням технологічних змін, посиленням регуляторного впливу та зростанням суспільного запиту на екологічно безпечну мобільність. Одним із ключових напрямів цієї трансформації є електрифікація транспорту, яка розглядається як базовий інструмент скорочення викидів парникових газів. У межах довгострокової кліматичної стратегії Європейського Союзу передбачено поступове виведення з експлуатації транспортних засобів із двигунами внутрішнього згоряння, що супроводжується активним розвитком інфраструктури електромобільності, включаючи зарядні станції та інтелектуальні енергетичні мережі.

Декарбонізація транспортного сектору не обмежується лише переходом до електротранспорту, а передбачає комплексні системні зміни в організації транспортних потоків та логістичних процесів. До таких змін належить розширення

мережі високошвидкісного залізничного сполучення як більш енергоефективної альтернативи автомобільному та авіаційному транспорту, цифровізація логістичних систем із використанням інтелектуальних платформ управління перевезеннями, а також розвиток мультимодальних транспортних рішень, що забезпечують оптимальне поєднання різних видів транспорту. Важливим напрямом є також впровадження сталих видів авіаційного палива, які дозволяють зменшити вуглецевий слід у секторі авіаперевезень, де електрифікація обмежена.

Особливість транспортного сектору полягає у його тісному взаємозв'язку з процесами урбанізації, просторового розвитку та змінами споживчої поведінки. Зростання міст, інтенсивність мобільності населення та трансформація логістичних ланцюгів безпосередньо впливають на обсяги транспортних викидів. У зв'язку з цим ефективна декарбонізація транспорту потребує узгодження екологічної, транспортної та містобудівної політики, а також впровадження інтегрованих підходів до планування міського простору, розвитку громадського транспорту та стимулювання переходу до більш сталих моделей мобільності. Такий комплексний підхід дозволяє не лише скорочувати викиди, але й підвищувати загальну ефективність транспортної системи та якість життя населення [7, с. 102–110].

Представлені у таблиці 2.6. дані свідчать про поступовий прогрес у зниженні викидів та активне впровадження електромобільності, що супроводжується швидким розвитком відповідної інфраструктури. Водночас збереження значної частки транспорту у викидах вказує на необхідність подальшого поглиблення структурних змін у секторі.

Таблиця 2.6.

Основні показники декарбонізації транспортного сектору ЄС

Показник	Значення	Примітка
Частка транспорту у викидах ЄС	23%	загальні викиди
Частка електромобілів у нових продажах	22–25%	2024 р.
Скорочення викидів від транспорту	–15%	від 2005 р.
Частка залізничного транспорту	18% вантажів	екологічно ефективний сегмент
Зростання інфраструктури зарядних станцій	> 1 млн точок	ЄС-27

Джерело: складено автором за [112] - [117]

Транспортний сектор Європейського Союзу залишається одним із ключових джерел викидів CO₂, однак демонструє поступову структурну трансформацію. Найбільше зростання у сегменті електромобільності та інфраструктури зарядних станцій, тоді як залізничний транспорт зберігає стратегічне значення як низьковуглецева альтернатива автомобільним перевезенням.

Сільське господарство характеризується специфічними викликами у процесі декарбонізації, оскільки значна частина викидів у цьому секторі формується внаслідок природно-біологічних, а не суто технологічних процесів. Основними джерелами парникових газів є метан (CH₄), що утворюється внаслідок ентеричного бродіння у тваринництві, а також закис азоту (N₂O), який виділяється в результаті застосування мінеральних добрив і обробітку ґрунтів. За даними Європейського агентства з навколишнього середовища, сільське господарство забезпечує близько 10–11 % загальних викидів парникових газів у ЄС, причому понад 50 % припадає саме на метан і закис азоту, що ускладнює їх скорочення традиційними інженерними методами.

У відповідь на ці виклики Європейський Союз послідовно інтегрує кліматичні цілі у Спільну сільськогосподарську політику, стимулюючи впровадження більш сталих аграрних практик. Серед них особливе значення мають регенеративне сільське господарство, агролісівництво, органічне виробництво та точне землеробство, які спрямовані на підвищення ефективності використання ресурсів і зниження вуглецевого сліду агровиробництва. Зокрема, застосування точного землеробства може зменшити використання добрив на 15–20 %, що прямо впливає на скорочення викидів N₂O [114].

Сектор землекористування, включаючи ліси та ґрунти, відіграє подвійну роль у кліматичній системі. З одного боку, він є джерелом викидів, пов'язаних із змінами у використанні земель, а з іншого – виступає важливим природним поглиначем вуглецю. Щорічне поглинання вуглецю лісами та ґрунтами становить близько 250–300 млн тонн CO₂-еквіваленту, що частково компенсує викиди інших

секторів економіки. Таким чином, ефективне управління земельними ресурсами стає ключовим елементом досягнення кліматичної нейтральності.

Структуру викидів та потенціал поглинання парникових газів в аграрному секторі ЄС відображено у таблиці 2.7., підкреслюючи його подвійний характер як джерела та одночасно поглинача вуглецю. Дані свідчать про домінування біогенних викидів, зокрема метану та закису азоту, що формують основну частку аграрного впливу на клімат. Водночас значний потенціал поглинання CO₂ лісами та зростання частки органічного землеробства вказують на можливості підвищення екологічної стійкості сектору.

Таблиця 2.7.

Викиди та поглинання в аграрному секторі ЄС

Показник	Значення	Коментар
Частка агросектору у викидах ЄС	11–12%	загальні викиди
Частка метану (CH ₄)	55% аграрних викидів	тваринництво
Частка N ₂ O	40%	добрива та ґрунти
Потенціал поглинання CO ₂ лісами	до 300 млн т/рік	природні поглиначі
Частка органічного землеробства	10% площ	тенденція зростання

Джерело: складено автором за [121] - [124]

Декарбонізація сільського господарства потребує комплексного підходу, який поєднує інноваційні агротехнології, зміну практик землекористування та інтеграцію екологічних пріоритетів у аграрну політику, забезпечуючи баланс між продовольчою безпекою та кліматичними цілями [8, с. 45–52].

Незважаючи на значні досягнення, шлях декарбонізації Європи стикається з глибокими структурними викликами, які впливають як на швидкість впровадження, так і на політичну доцільність.

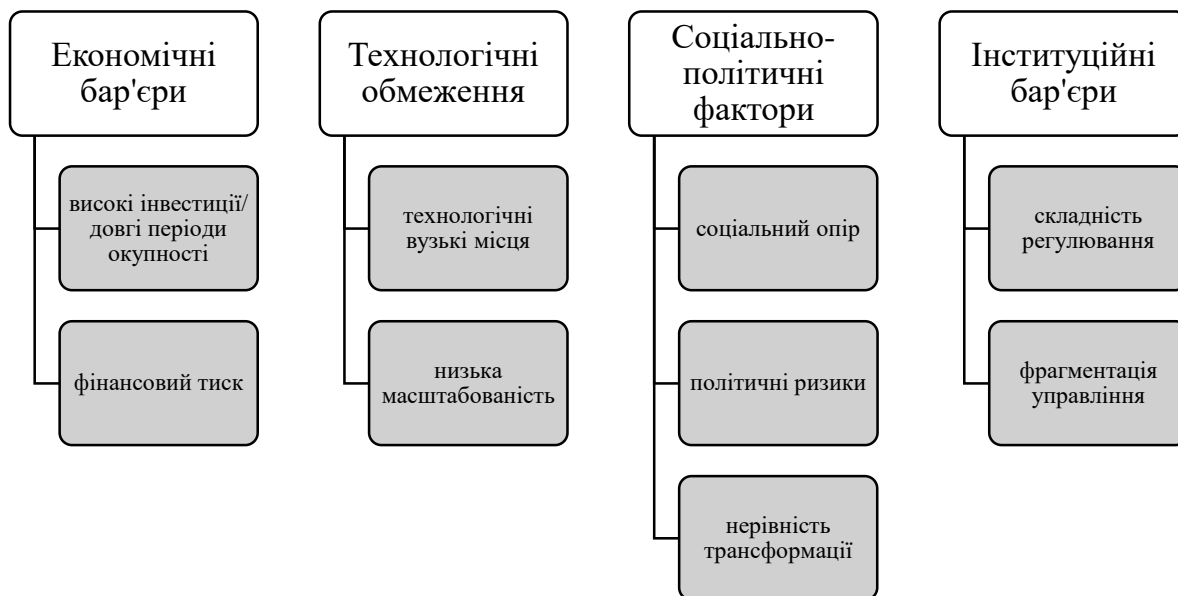


Рис. 2.17. Системні бар'єри декарбонізації в умовах глобальної циркулярної економіки

Джерело: складено автором

Рисунок 2.17. репрезентує ключові системні обмеження, що стримують реалізацію декарбонізаційних стратегій у глобальному економічному просторі, структуровані за економічним, технологічним, інституційним та соціально-політичним вимірами. До економічних бар'єрів віднесено високі інвестиційні потреби та значний фінансовий тиск, пов'язаний із трансформацією енергетичних і виробничих систем, що особливо актуально для капіталомістких галузей. Технологічний блок відображає наявність «вузьких місць», пов'язаних із недостатньою зрілістю або масштабованістю інноваційних рішень, зокрема у сфері водневої енергетики, накопичення енергії та уловлювання вуглецю. Кілька критично важливих технологій залишаються недостатньо розвиненими або занадто дорогими для широкомасштабного впровадження:

- ⇒ великомасштабні системи зберігання енергії,
- ⇒ інфраструктура зеленого водню,
- ⇒ технології прямого захоплення повітря,

⇒ рішення для глибокої електрифікації промисловості.

Ці технологічні прогалини уповільнюють повну декарбонізацію секторів, які важко скасовувати.

Інституційний вимір представлений складністю регуляторного середовища та фрагментацією управлінських підходів, що ускладнює координацію політик на національному та міжнародному рівнях. Соціально-політичний аспект охоплює фактори суспільного опору та політичних ризиків, які виникають у процесі структурних змін, зокрема у регіонах, залежних від традиційних галузей. Сукупність цих бар'єрів формує багаторівневу систему стримувальних чинників, що потребує комплексного підходу до управління трансформаційними процесами, поєднання фінансових, технологічних та інституційних інструментів, а також узгодження інтересів ключових стейкхолдерів у межах переходу до низьковуглецевої та циркулярної моделі розвитку.

Азія є одним із найскладніших та найнеоднорідніших регіонів з точки зору декарбонізації, поєднуючи високоіндустріалізовані економіки, країни, що швидко розвиваються, та країни, що розвиваються, з низьким рівнем доходу. На відміну від відносно інтегрованої політичної структури Європейського Союзу, Азія демонструє фрагментований, але швидкозмінний ландшафт управління кліматом, сформований національними пріоритетами, проблемами енергетичної безпеки та імперативами розвитку. Регіон відповідає за понад половину світових викидів парникових газів, що робить його траєкторію декарбонізації вирішальною для глобальних кліматичних результатів [1, с. 52–61].

Процес декарбонізації в Азії фундаментально формується надзвичайною різноманітністю економічних структур, енергетичних систем та моделей політичного управління. Регіон включає високорозвинені економіки, такі як Японія та Південна Корея, швидко індустріалізованих гігантів, таких як Китай та Індія, та менші економіки, що розвиваються, у Південно-Східній Азії, кожна з яких дотримується різних шляхів енергетичного переходу.

Ключовою регіональною характеристикою є постійна залежність від вугілля як основного джерела енергії, особливо в Китаї, Індії, Індонезії та В'єтнамі. Вугілля залишається глибоко вкоріненим у системах виробництва електроенергії завдяки своїй доступності, наявності на внутрішньому ринку та ролі у підтримці промислового зростання. Як результат, Азія одночасно має найшвидше зростаючі ринки відновлюваної енергії у світі та найбільшу базу споживання вугілля [2, с. 88–97]. Представлені у таблиці 2.8. дані свідчать про домінування вугілля в енергобалансі Китаю, Індії та Індонезії, де його частка перевищує 60–70 %, що створює суттєві виклики для процесів декарбонізації. Водночас у Японії та Південній Кореї спостерігається більш диверсифікована структура енергетики із значною роллю природного газу, атомної енергетики та поступовим зростанням відновлюваних джерел.

Таблиця 2.8.

Структура виробництва електроенергії у вибраних азійських економіках (2023 р., %)

Країна	Вугілля	Природний газ	Атомна енергетика	Відновлювані джерела енергії
Китай	61%	3%	5%	31%
Індія	74%	6%	3%	17%
Японія	30%	34%	7%	29%
Південна Корея	36%	29%	26%	9%
Індонезія	62%	18%	0%	20%

Джерело: складено автором за [127]

Важливою характеристикою сучасного розвитку азійського регіону є мегатренд урбанізації, який виступає одним із ключових драйверів зміни енергетичних та екологічних параметрів економіки. Саме в Азії зосереджена більшість найбільших мегаполісів світу, зокрема Шанхай, Делі, Токіо, Джакарта та Сеул, які формують нову архітектуру глобального економічного простору. За даними ООН, станом на 2023 рік понад 55% населення світу проживає у містах, і до 2050 року цей показник зросте до майже 70%, причому близько 90% приросту міського населення припадатиме саме на країни Азії та Африки. Така концентрація

населення у міських агломераціях супроводжується стрімким зростанням попиту на енергію в транспортному секторі, будівництві, системах кондиціонування та охолодження, а також у промисловому виробництві, що безпосередньо впливає на динаміку викидів парникових газів.

Урбанізація створює не лише виклики, але й нові можливості для декарбонізації. Великі міста дедалі більше виступають як експериментальні платформи для впровадження низьковуглецевих рішень, включаючи електрифікацію громадського транспорту, розвиток «розумних» енергетичних мереж, енергоефективне будівництво та цифрові системи управління інфраструктурою. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, понад 70% глобальних енергетичних викидів припадає саме на міські території, що підкреслює їхню ключову роль у досягненні кліматичних цілей. У цьому контексті міста Азії стають важливими центрами інновацій, де відпрацьовуються моделі сталого розвитку, які згодом можуть масштабуватися на національному рівні [3, с. 41–49].

Однак, регіон характеризується високим рівнем кліматичної вразливості, що виступає додатковим фактором впливу на політику декарбонізації. Багато азійських мегаполісів розташовані у прибережних зонах або регіонах із підвищеним ризиком екстремальних погодних явищ, таких як повені, тайфуни та хвилі спеки. За оцінками Світового банку, до 2050 року понад 1 млрд міських жителів у Азії можуть опинитися під загрозою кліматичних ризиків. Це зумовлює необхідність інтеграції кліматичної адаптації та декарбонізації у єдину політику міського розвитку, орієнтовану на підвищення стійкості урбанізованих систем.

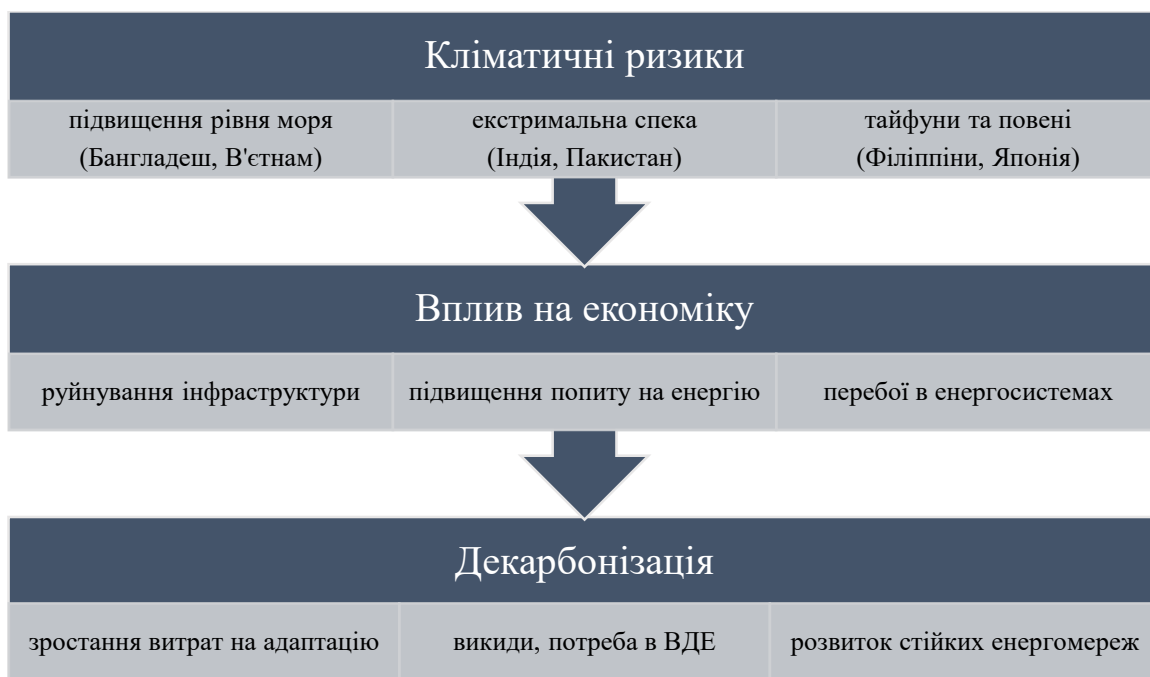


Рис. 2.18. Кліматичні ризики в Азії та їх вплив на процеси декарбонізації

Джерело: складено автором

Ключові кліматичні ризики характерні для країн Азії, зокрема підвищення рівня моря, екстремальні температурні явища та гідрометеорологічні катастрофи (рис.2.18.). Показано, що ці фактори мають системний вплив на соціально-економічний розвиток, зокрема через зростання енергоспоживання, пошкодження інфраструктури та посилення міграційних процесів. Водночас кліматична вразливість виступає важливим драйвером декарбонізації, стимулюючи країни до розвитку стійких енергетичних систем і впровадження низьковуглецевих технологій. Ця вразливість посилює політичну мотивацію до стратегій адаптації, але часто конкурує з короткостроковими пріоритетами економічного зростання.

Ще однією характеристикою є нерівномірний інституційний потенціал різних країн. У той час як Китай розробив централізовані довгострокові механізми кліматичного планування, багато держав Південно-Східної Азії значною мірою покладаються на міжнародну фінансову допомогу та багатосторонні банки розвитку для фінансування зеленого переходу [4, с. 73–82].

Сучасну динаміку урбанізаційних процесів у провідних країнах Азії станом на 2024 рік, відображено у таблиці 2.9., що дозволяє оцінити як рівень урбанізації, так і інтенсивність зростання міського населення. Представлені дані свідчать про значну диференціацію між країнами, де високорозвинені економіки, такі як Японія та Південна Корея, характеризуються високою часткою міського населення (понад 80–90 %) при відносно низьких темпах приросту, що вказує на досягнення стадії зрілої урбанізації. Натомість країни, що розвиваються, зокрема Індія та Індонезія, демонструють нижчий рівень урбанізації, але значно вищі темпи її зростання, що відображає активну фазу урбанізаційного переходу.

Таблиця 2.9.

Динаміка урбанізації у вибраних країнах Азії (2024)

Країна	Міське населення (%)	Річні темпи зростання міського населення (%)	Кількість мегаполісів
Японія	92%	0,1%	3
Китай	65%	1,2%	15+
Індія	36%	2,0%	5
Індонезія	58%	1,8%	2
Південна Корея	81%	0,3%	2

Джерело: складено автором за [128]

Особливу увагу привертає Китай, який поєднує відносно високий рівень урбанізації із суттєвими темпами приросту міського населення та найбільшою кількістю мегаполісів, що підкреслює його роль як одного з глобальних центрів урбаністичного розвитку. Урбанізація в Азії є неоднорідним процесом, який суттєво впливає на економічне зростання, інфраструктурні потреби та екологічне навантаження, формуючи важливі передумови для трансформації енергетичних систем і реалізації політики декарбонізації.

Азійські стратегії декарбонізації вирізняються високим рівнем диференціації, що зумовлено неоднорідністю економічного розвитку, інституційних моделей управління та галузевої структури економік. На відміну від

Європейського Союзу, де кліматична політика базується на уніфікованій нормативно-правовій системі, у країнах Азії домінує національно орієнтований підхід до кліматичного регулювання, який часто реалізується через галузеві програми та стратегічні індустріальні політики. Така модель забезпечує більшу гнучкість, але водночас ускладнює координацію дій на регіональному рівні та формування єдиного кліматичного простору.

Особливо показовою є модель декарбонізації Китаю, яка ґрунтується на централізованому управлінні та інтеграції кліматичних цілей у загальнодержавну стратегію економічного розвитку. Китай, як найбільший у світі емітент парникових газів (близько 30 % глобальних викидів CO₂), відіграє системоутворюючу роль у глобальних процесах декарбонізації. Офіційні зобов'язання щодо досягнення піку викидів до 2030 року та вуглецевої нейтральності до 2060 року стали ключовими орієнтирами його довгострокової політики. У межах цієї моделі важливу роль відіграють п'ятирічні плани, які встановлюють обов'язкові показники енергоефективності та обмеження щодо інтенсивності викидів, а також спрямовують інвестиційні потоки у стратегічні сектори.

Китай демонструє безпрецедентні масштаби розвитку відновлюваної енергетики, у 2023–2024 рр. на країну припадало понад 40 % нових світових потужностей сонячної та вітрової енергетики, а загальна встановлена потужність ВДЕ перевищила 1 400 ГВт. Паралельно активно розвивається національна система торгівлі викидами, запущена у 2021 році, яка охоплює насамперед енергетичний сектор і є найбільшою у світі за обсягом покриття викидів. Значні інвестиції також спрямовуються у розвиток електромобільності (таблиця 2.10.) Китай забезпечує понад 50 % глобального виробництва електромобілів і акумуляторів, що формує його технологічне лідерство у цьому сегменті.

Таблиця 2.10.

Індикатори енергетики та декарбонізації Китаю (2023–2024)

Індикатор	Значення
Частка викидів CO ₂ (світова)	31%
Частка вугілля у виробництві електроенергії	61%
Встановлена сонячна потужність	520 ГВт
Встановлена вітрова потужність	~470 ГВт
Покриття торгівлею вуглецевими квотами	40% національних викидів
Частка ринку електромобілів (нові продажі)	35%

Джерело: складено автором за [129], [130], [131]

Китай демонструє парадоксальну модель енергетичного переходу, поєднуючи високу залежність від вугілля з одночасним світовим лідерством у розвитку відновлюваної енергетики та електромобільності. Масштабне впровадження сонячних і вітрових потужностей впливає на прискорену декарбонізацію енергетичного сектора, проте загальна структура генерації вуглецю залишається інтенсивною. Система торгівлі квотами та розвиток ринку електромобілів формують інституційні та технологічні механізми зниження викидів.

Стратегія декарбонізації Індії формується під значним впливом соціально-економічних пріоритетів, зокрема необхідності забезпечення стійкого економічного зростання, подолання бідності та розширення доступу населення до енергетичних ресурсів. У цьому контексті енергетична трансформація розглядається не лише як екологічний імператив, а як інструмент розвитку, що поєднує кліматичні цілі із завданнями інклюзивного зростання.

Таблиця 2.11 відображає ключові параметри енергетичної структури Індії та основні індикатори її енергетичного переходу, що дозволяє оцінити поточний стан і перспективи декарбонізації. Наведені дані свідчать про збереження високої залежності від вугілля, частка якого у виробництві електроенергії становить близько 74 %, що підкреслює структурні обмеження трансформації енергетичного сектору. Водночас спостерігається активне нарощування потужностей

відновлюваної енергетики, загальний обсяг яких досяг 190 ГВт, зокрема за рахунок розвитку сонячної (75 ГВт) та вітрової (45 ГВт) генерації.

Важливим досягненням є високий рівень електрифікації населення, що наближається до 97 %, що свідчить про успішну реалізацію політики розширення доступу до енергії. Разом із тим амбітна ціль досягнення 500 ГВт потужностей невикопного палива до 2030 року демонструє стратегічну орієнтацію країни на поступовий перехід до низьковуглецевої енергетики. Загалом таблиця відображає характерну для Індії модель «подвійного розвитку», в межах якої одночасно зберігається домінування традиційних джерел енергії та активно розвиваються відновлювані технології.

Внаслідок цього декарбонізаційна модель Індії характеризується підходом «енергетичного розширення», за якого відновлювані джерела енергії не витісняють викопне паливо у короткостроковій перспективі, а доповнюють його, формуючи так звану «подвійну енергетичну систему». За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2023–2024 рр. Індія входила до числа світових лідерів за темпами введення нових потужностей сонячної енергетики, проте загальне зростання попиту на електроенергію випереджає темпи декарбонізації.

Таблиця 2.11.

Структура енергетики Індії та показники переходу

Показник	Значення
Частка вугілля у виробництві електроенергії	74%
Потужність відновлюваної енергії	190 ГВт
Потужність сонячної енергії	75 ГВт
Потужність вітрової енергії	45 ГВт
Рівень електрифікації	97%
Запланована потужність невикопного палива (2030)	500 ГВт

Джерело: складено автором за [130]

Інституційна база реалізації кліматичної політики Індії включає низку стратегічних ініціатив, серед яких ключову роль відіграє Національна сонячна місія, спрямована на масштабування використання сонячної енергії, а також програми стимулювання внутрішнього виробництва «зелених» технологій через

механізми «Програми стимулювання виробництва». Важливим напрямом є також розвиток водневої енергетики в межах Національної місії зеленого водню, яка передбачає створення конкурентоспроможного ринку «зеленого» водню та інтеграцію його у промислові процеси.

Японія та Південна Корея репрезентують групу високорозвинених індустріальних економік Азії, для яких характерна інноваційно орієнтована модель декарбонізації, що спирається на технологічний прогрес і високий рівень інституційної координації. Обидві країни задекларували досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року та реалізують комплексні стратегії енергетичної трансформації, що передбачають значні інвестиції у водневу енергетику, підвищення енергоефективності, а також розвиток технологій уловлювання, використання та зберігання вуглецю. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, Японія та Південна Корея входять до числа світових лідерів за обсягами фінансування інновацій у сфері чистої енергетики та декарбонізації промисловості.

Стратегічний підхід Японії базується на диверсифікації низьковуглецевих джерел енергії з акцентом на розвиток водневих енергетичних систем як одного з ключових елементів майбутнього енергобалансу. Важливими напрямками є також впровадження технологій спільного спалювання аміаку на теплових електростанціях для зниження викидів CO₂, а також модернізація та поступове відновлення ролі ядерної енергетики як стабільного низьковуглецевого джерела базового навантаження. Додатково Японія активно інвестує у розвиток інфраструктури для імпорту «зеленого» водню та аміаку, що зумовлено обмеженістю власних ресурсів відновлюваної енергії.

Південна Корея реалізує політику «зеленої» індустріальної трансформації, інтегруючи декарбонізаційні цілі у промислову політику та стратегії цифрового розвитку. Пріоритетними напрямками виступають масштабне розширення офшорної вітрової енергетики, впровадження інтелектуальних систем управління енергоспоживанням, а також стимулювання низьковуглецевого виробництва через

державні інвестиційні програми. Значна увага приділяється розвитку «розумних» енергомереж і цифрових платформ, що дозволяють оптимізувати використання енергоресурсів та інтегрувати відновлювані джерела у національну енергосистему.

Проте, обидві країни стикаються з низкою структурних обмежень, зокрема обмеженістю внутрішніх ресурсів відновлюваної енергії та високим рівнем залежності від імпорту енергоресурсів, який у випадку Японії перевищує 85%. Це зумовлює необхідність формування диверсифікованих портфелів енергопостачання, що поєднують розвиток внутрішніх низьковуглецевих технологій із зовнішніми енергетичними партнерствами. Декарбонізаційні стратегії Японії та Південної Кореї відображають технологічно складну, але збалансовану модель переходу до кліматично нейтральної економіки, орієнтовану на інновації, енергетичну безпеку та довгострокову стійкість [7, с. 92–101].

Таблиця 2.12

Порівняльні показники декарбонізації: Японія проти Південної Кореї

Показник	Японія	Південна Корея
Ціль щодо вуглецевої нейтральності	2050	2050
Частка вугілля в електроенергетиці	30%	36%
Частка відновлюваної енергії	29%	9%
Частка ядерної енергетики	7%	26%
Статус водневої стратегії	Розвинена	Розвивається
Система ціноутворення на вуглець	ETS + податок	ETS

Джерело: складено автором за [127]

Японія та Південна Корея демонструють різні моделі декарбонізації за спільну стратегічну ціль досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року (табл.2.12). Японія більше орієнтується на диверсифікацію енергетичного балансу через розвиток відновлюваної енергетики та водних технологій, тоді як Південна Корея робить акцент на ядерній енергетиці як ключовому низьковуглецевому

джерелі. Обидві країни виконують системи торгівлі викидами, однак регуляторні інструменти та структура енергетичного переходу суттєво відрізняються.

Такі країни, як Індонезія, В'єтнам, Таїланд та Філіппіни, переживають швидке економічне зростання, що супроводжується зростанням попиту на енергію. Стратегії декарбонізації в цьому субрегіоні часто підтримуються ззовні через міжнародні механізми фінансування кліматичних заходів.

Індонезія, наприклад, є одним з найбільших експортерів вугілля у світі, але також ініціювала програми дострокового виведення з експлуатації вугільних електростанцій за міжнародної підтримки. В'єтнам швидко розширює потужності сонячної енергетики, стаючи одним із найбільш швидкозростаючих ринків відновлюваної енергетики в Південно-Східній Азії [8, с. 55–63].

Таблиця 2.13. відображає ключові індикатори енергетичного переходу в країнах Південно-Східної Азії станом на 2024 рік, дозволяючи оцінити рівень залежності від викопного палива, динаміку попиту на енергію та роль фінансових ресурсів у процесах декарбонізації. Наведені дані свідчать про збереження значної частки вугілля в енергетичних балансах більшості країн регіону, зокрема в Індонезії та Таїланді, що створює структурні бар'єри для швидкого переходу до низьковуглецевої енергетики. Водночас у ряді країн, таких як В'єтнам, спостерігається відносно вища частка відновлюваних джерел енергії, що вказує на поступове просування енергетичної трансформації.

Суттєвим фактором є також високі темпи зростання попиту на енергію, які у деяких країнах перевищують 5–6 % на рік, що ускладнює процеси декарбонізації через необхідність одночасного задоволення зростаючих енергетичних потреб. Крім того, значна залежність від зовнішнього фінансування кліматичних заходів підкреслює важливість міжнародної підтримки та інвестицій для реалізації енергетичного переходу в регіоні. Країни Південно-Східної Азії перебувають на початкових етапах декарбонізації, де ключовими викликами залишаються

поєднання економічного зростання, енергетичної безпеки та кліматичних зобов'язань.

Таблиця 2.13

Індикатори енергетичного переходу в Південно-Східній Азії (2024)

Країна	Частка вугілля	Частка відновлюваних джерел енергії	Зростання попиту на енергію (річне зростання %)	Залежність від фінансування кліматичних змін
Індонезія	62%	20%	4,5%	Високий
В'єтнам	45%	35%	6%	Високий
Таїланд	55%	25%	3%	Середній
Філіппіни	48%	22%	4%	Високий
Малайзія	42%	28%	3%	Середній

Джерело: складено автором за [131]

Країни Південно-Східної Азії характеризуються одночасним поєднанням стрімкого зростання попиту на енергоресурси та значною залежністю від викопного палива, передусім вугілля, яке залишається ключовим джерелом енергопостачання. Водночас регіон володіє суттєвим потенціалом для розвитку відновлюваної енергетики, що вже частково реалізується, зокрема у В'єтнамі та Малайзії, де спостерігається активне нарощування «зеленої» генерації. Разом із тим висока залежність від міжнародного кліматичного фінансування свідчить про обмеженість внутрішніх інвестиційних можливостей та підкреслює необхідність посилення глобальної підтримки для ефективної реалізації процесів декарбонізації в регіоні.

Азія відіграє подвійну роль у глобальній декарбонізації, оскільки вона виступає одночасно основним джерелом викидів та світовим лідером у виробництві та впровадженні чистих технологій.

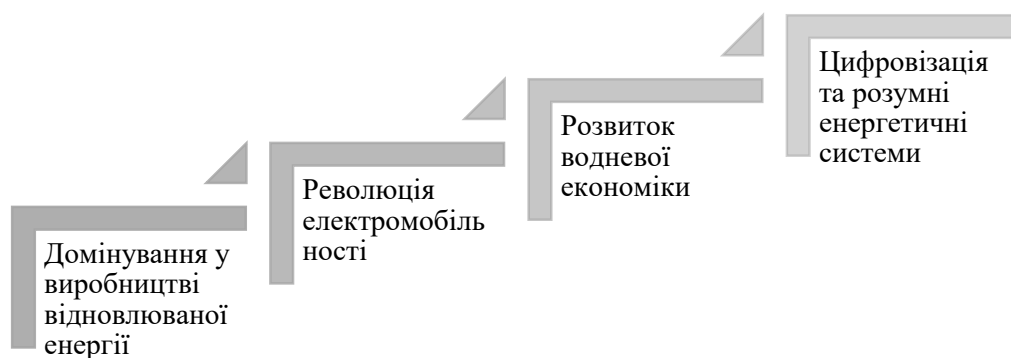


Рис. 2.19. Ключові технологічні драйвери декарбонізації в глобальній економіці

Джерело: складено автором

Основні технологічні напрями, що формують сучасну парадигму декарбонізації та забезпечують перехід до низьковуглецевої економіки на рис.2.19., такі як домінування відновлюваних джерел енергії, що виступає базою енергетичної трансформації, тоді як розвиток електромобільності сприяє зниженню викидів у транспортному секторі. Важливим елементом є формування водневої економіки як перспективного джерела чистої енергії для промисловості та енергетики, а також впровадження цифрових та інтелектуальних енергетичних систем, що забезпечують ефективне управління ресурсами та інтеграцію різних енергетичних рішень. Послідовність і взаємозв'язок ключових технологічних інновацій у сукупності формують комплексний механізм декарбонізації, спрямований на підвищення енергоефективності, зниження вуглецевого навантаження та забезпечення сталого розвитку.

Китай домінує у світових ланцюгах поставок сонячних фотоелектричних панелей, компонентів вітрових турбін, літій-іонних акумуляторів. Це технологічне лідерство створює структурну перевагу на світових ринках енергетичного переходу та значно знижує вартість технологій відновлюваної енергії в усьому світі.

Таблиця 2.14.

Частка Азії у світовому виробництві чистих технологій (2024)

Технологічний сектор	Китай	Південна Корея	Японія	Решта Азії	Глобальна частка (загалом по Азії)
Сонячні фотоелектричні модулі	80%	2%	3%	5%	90%
Вітрові компоненти	60%	5%	4%	6%	75%
Літій-іонні акумулятори	75%	10%	5%	3%	93%

Джерело: складено автором за [125]

Азія займає домінуючу позицію у світовому виробництві ключових чистих технологій, що виступає критичною кількістю для глобальної декарбонізації. Абсолютним лідером виступає Китай, який контролює всі виробничі потужності у сфері сонячної енергетики та акумуляторів. Південна Корея та Японія сплавляють важливу роль у високотехнологічних сегментах, зокрема у виробництві батарей. Така концентрація виробництва створює як можливості (масштабування енергетичного переходу), так і ризики (геополітична залежність та вразливість ланцюгів постачання).

Азія виступає ключовим центром глобальної трансформації автомобільної галузі у напрямі електрифікації транспорту. Лідерські позиції належать Китаю, який забезпечує найбільші у світі обсяги виробництва та споживання електромобілів, що зумовлено поєднанням активної державної підтримки, політики покращення якості повітря в містах та стратегічної орієнтації на розвиток високотехнологічних галузей. Провідні компанії, зокрема BYD і CATL, сформували глобальне лідерство у сфері виробництва електромобілів і акумуляторних технологій, суттєво впливаючи на структуру світового ринку.

Водночас Південна Корея та Японія посилюють свої позиції через інноваційні розробки у сфері акумуляторних систем, водневих паливних елементів і комплексних рішень для електрифікації транспорту, що відображено у таблиці 2.15. Така концентрація технологічного потенціалу в регіоні формує передумови для прискорення глобальної декарбонізації транспортного сектору та зміцнення

конкурентних переваг азійських економік у новій енергетичній парадигмі [9, с. 118–126].

Таблиця 2.15

Індикатори ринку електромобілів в Азії (2024)

Індикатор	Китай	Японія	Південна Корея	Індія
Частка електромобілів у продажах нових автомобілів	35%	3%	9%	2%
Річне виробництво електромобілів (млн одиниць)	9,5	0,5	0,4	0,2
Частка виробництва акумуляторів (світова)	75%	5%	10%	2%
Кількість громадських зарядних станцій	>2 мільйони	40 000	200 000	70 000

Джерело: складено автором за [132]

Японія та Південна Корея демонструють високий рівень прогресу у розвитку водневих технологій, активно поєднуючи наукові дослідження з практичною реалізацією пілотних проєктів. У цих країнах водень розглядається як стратегічний енергоносіє, здатний забезпечити глибоку декарбонізацію секторів, де електрифікація має обмежений потенціал, зокрема у важкій промисловості, транспорті та енергетиці. В обох державах функціонують розширені національні водневі стратегії, що передбачають створення повноцінної інфраструктури виробництва, транспортування та споживання водню, а також стимулювання попиту через розвиток водневого транспорту.

Японія робить акцент на імпорті водню та його використанні в транспортному секторі, розвиваючи мережу заправних станцій (понад 150 об'єктів) і поступово збільшуючи парк автомобілів на водневих паливних елементах. Південна Корея, у свою чергу, орієнтується на інтеграцію водню в промисловість та енергетику, демонструючи більш високі показники використання водневого транспорту (близько 30 тис. одиниць) і розвинену інфраструктуру заправних станцій. Обидві країни планують значне нарощування виробництва водню до 2030

року приблизно до 3-4 млн тонн на рік, що свідчить про їх стратегічну орієнтацію на формування водневої економіки[135] .

Китай, хоча і дещо відстає у впровадженні водневого транспорту порівняно з Японією та Південною Кореєю, демонструє найвищі темпи масштабування виробництва водню. Країна активно розширює національну водневу стратегію, поєднуючи розвиток як «зеленого» водню, виробленого на основі відновлюваних джерел енергії, так і «блакитного» водню з використанням технологій уловлювання та зберігання вуглецю. Китай також формує найбільшу в регіоні інфраструктуру водневих заправних станцій (понад 300 одиниць) і планує досягти виробництва понад 10 млн тонн водню щорічно до 2030 року. Його стратегія має більш диверсифікований характер і орієнтована на використання водню як у промисловості, так і в енергетичному секторі [134].

Однією з ключових тенденцій сучасної трансформації енергетичних систем в Азії виступає активна інтеграція цифрових технологій, що суттєво змінює підходи до управління енергоспоживанням та підвищення енергоефективності. Використання інтелектуальних енергетичних мереж, алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації навантаження, а також технологій Інтернету речей дозволяє забезпечити більш раціональне використання ресурсів, зменшити втрати енергії та сприяти скороченню викидів парникових газів. У цьому контексті цифровізація стає важливим інструментом досягнення цілей декарбонізації, особливо в умовах зростаючого попиту на енергію та ускладнення енергетичних систем.

Показовим прикладом є Сінгапур, який реалізує концепцію «розумної нації», інтегруючи цифрову інфраструктуру з міським плануванням, транспортними системами та енергетикою. Такий підхід дозволяє досягати високого рівня енергоефективності, оптимізувати споживання ресурсів у режимі реального часу та формувати комплексну модель сталого міського розвитку [10, с.

44–51]. Подібні підходи, хоча й з різною інтенсивністю, впроваджуються і в інших країнах регіону.

Аналіз розвитку цифровізації енергетичних систем у вибраних азійських економіках свідчить про значну диференціацію рівнів технологічної зрілості. Найвищий рівень інтеграції цифрових рішень демонструє Сінгапур, де інтелектуальні мережі та системи управління енергією на основі штучного інтелекту функціонують на розширеному рівні, що забезпечує його лідерські позиції у рейтингах «розумних міст» Азії. Китай характеризується високим, але динамічно зростаючим рівнем цифровізації, зокрема через масштабне впровадження систем оптимізації енергомереж у великих міських агломераціях. Японія та Південна Корея демонструють стабільно високі показники розвитку цифрової інфраструктури та енергоефективності, що відображається у їхніх позиціях серед провідних «розумних міст» регіону.

Натомість Індія перебуває на етапі поступової модернізації енергетичних систем, де рівень впровадження інтелектуальних мереж та цифрових технологій залишається середнім, але має значний потенціал для зростання. Основні зусилля зосереджені на оновленні енергетичної інфраструктури та розширенні доступу до сучасних технологій управління енергією.

Порівняльний аналіз процесів декарбонізації в Європі та Азії виявляє дві принципово різні моделі управління кліматом, сформовані контрастними політичними системами, рівнями економічного розвитку, наявністю енергетичних ресурсів та інституційним потенціалом. У той час як Європа являє собою високоінституціоналізовану, юридично обов'язкову та інтеграційно-орієнтовану модель, Азія демонструє гетерогенний, орієнтований на розвиток та багатошвидкісний перехідний шлях. Разом ці два регіони визначають глобальний напрямок декарбонізації, оскільки на них припадає більшість як історичних, так і поточних викидів парникових газів [1, с. 62–71].

Європейський Союз та країни Азії суттєво відрізняються своєю політичною архітектурою та логікою управління.

Модель ЄС базується на наднаціональному регулюванні, де кліматичні цілі вбудовані в юридично обов'язкові рамки, що застосовуються до всіх держав-членів. Основною особливістю цієї моделі є інтеграція політики, що означає, що кліматичні цілі не ізольовані, а включені в енергетичну, транспортну, сільськогосподарську, податкову та промислову політику.

Ключові характеристики включають:

- обов'язкові цілі щодо скорочення викидів,
- централізоване ціноутворення на вуглець (EU ETS),
- гармонізоване кліматичне законодавство в державах-членах,
- сильні механізми забезпечення дотримання законодавства через інституції ЄС.

Кліматична політика Європейського Союзу характеризується високим рівнем інституційної інтеграції та використанням ринкових механізмів регулювання викидів, зокрема системи торгівлі квотами. Поєднання амбітних цілей декарбонізації, високої ціни на вуглець та значних інвестицій у зелену трансформацію формує один із найбільш розвинених кліматичних режимів у світі.

Це створює передбачуване довгострокове інвестиційне середовище, яке заохочує участь приватного сектору в зелених технологіях. Підхід ЄС часто описують як «регуляторну державну модель декарбонізації», де право та інституції рухають трансформацію [2, с. 88–96].

На противагу, Азія дотримується державоцентричної та суверенітетно орієнтованої моделі, де кліматична політика підпорядкована національним пріоритетам розвитку. Не існує регіонального еквівалента інтегрованої системі управління ЄС, що призводить до різноманітних національних стратегій.

Китай представляє гібридну модель, що поєднує централізоване планування з ринковими інструментами, такими як торгівля вуглецевими квотами. Індія надає пріоритет доступу до енергії та економічному розвитку, тоді як Японія та Південна

Корея наголошують на технологічних інноваціях та промисловій конкурентоспроможності.

Ключові характеристики включають:

- національні кліматичні цілі без наднаціонального забезпечення виконання,
- залежність від інструментів промислової політики,
- поступові стратегії переходу,
- сильну роль державних підприємств в енергетичних системах.

Кліматична політика провідних азійських економік характеризується поєднанням спільних довгострокових цілей декарбонізації та суттєвих відмінностей у темпах і механізмах їх досягнення. Китай та Індія залишаються більш залежними від вугілля та державного сектора, тоді як Японія та Південна Корея демонструють вищий рівень інституційної інтеграції кліматичної політики та більш розвинені ринкові механізми регулювання викидів. Загалом регіональна модель характеризується поступовістю переходу та з'єднанням державного планування з елементами ринкових інструментів.

Ця модель відображає «парадигму декарбонізації, орієнтованої на розвиток», де скорочення викидів збалансовано з цілями економічного зростання та скорочення бідності [3, с. 74–83]. Різниця суттєво впливає на швидкість впровадження, інвестиційну визначеність та поширення технологій

Таблиця 2.16.

Порівняльна характеристика моделей декарбонізації ЄС та Азії

Вимір	Європейський Союз	Азія
Рівень управління	Наднаціональний	Національний
Узгодженість політики	Високий	Середній/Низький
Правозастосування	Сильний	Обмежений
Гнучкість	Помірна	Високий
Інвестиційна визначеність	Висока	Змінна
Швидкість впровадження	Помірна, але стабільна	Нерівномірна (швидка в деяких країнах)
Роль ринкових механізмів	Центральний (СТВ)	Змішаний
Роль держави	Регуляторний	Стратегічний/Інтервенційний

Джерело: складено автором за [135]

Порівняння моделей декарбонізації Європейського Союзу та Азії демонструє принципові відмінності у підходах до кліматичного управління. ЄС характеризується високим рівнем інституційної узгодженості, жорстким правозастосуванням та домінуванням ринкових механізмів регулювання викидів, що забезпечують стабільність та інвестиційну передбачуваність. Натомість азійської моделі є більш гнучкою та державоцентричною, з високим рівнем варіативності між країнами, що дозволяє швидше адаптувати політику до національних економічних позицій, але знижує загальну узгодженість регіонального переходу.

Порівняльні характеристики інвестиційної активності та рівня викидів парникових газів у Європейському Союзі та країнах Азії у 2023–2024 рр. дозволяють оцінити масштаб і специфіку декарбонізаційних процесів у цих регіонах. Наведені дані свідчать про суттєву асиметрію, де Азія генерує понад половину світових викидів CO₂ (близько 53 %), тоді як частка ЄС становить лише близько 7 %, що відображає як масштаб економічної активності регіону, так і його енергетичну структуру.

Таблиця 2.17.

Порівняльні показники інвестицій та викидів (2023–2024)

Показник	Європейський Союз	Азія
Частка світових викидів CO ₂	7%	53%
Інвестиції в чисту енергетику	520 млрд євро/рік	1,1 трлн доларів США/рік
Додаткові потужності відновлюваної енергетики (щорічно)	70 ГВт	350+ ГВт
Середня ціна вуглецю	70–90 євро/тCO ₂	5–30 доларів США/тCO ₂ (значно варіюється)

Джерело: складено автором за [135]

Азія демонструє значно вищі обсяги інвестицій у чисту енергетику та темпи введення нових потужностей відновлюваної енергетики, що перевищують європейські показники у кілька разів. Це свідчить про її ключову роль у глобальному енергетичному переході. Європейський Союз вирізняється більш жорсткою кліматичною політикою, що проявляється у значно вищій середній ціні вуглецю, яка формує сильні економічні стимули для скорочення викидів. Загалом таблиця демонструє різні моделі декарбонізації: ЄС як регуляторного лідера, та Азії як основного центру масштабних трансформацій і інвестицій.

Процеси декарбонізації зумовлюють масштабну структурну трансформацію економіки як у Європі, так і в Азії, однак їхні макроекономічні ефекти та розподільчі наслідки істотно відрізняються залежно від моделі розвитку та інституційного середовища. У європейському контексті декарбонізація дедалі більше набуває характеру комплексної стратегії модернізації промисловості, спрямованої на підвищення технологічного рівня виробництва та формування нових конкурентних переваг.

У межах цієї трансформації відбувається глибока перебудова ключових секторів економіки, насамперед енергоємних галузей, таких як металургія, хімічна промисловість і автомобілебудування. Перехід до низьковуглецевих технологій стимулює розвиток секторів, пов'язаних із виробництвом відновлюваної енергії, «зеленою» інфраструктурою та інноваційними рішеннями у сфері

енергоефективності. Одночасно спостерігається активне зростання інвестицій у чисту енергетику, що створює нові ринки та сприяє перерозподілу капіталу на користь екологічно орієнтованих напрямів.

Важливим економічним чинником стає розширення механізмів ціноутворення на вуглець, які суттєво впливають на структуру виробничих витрат і стимулюють підприємства до впровадження низьковуглецевих технологій. Разом із тим процеси декарбонізації супроводжуються посиленням регіональної диференціації, оскільки темпи та масштаби промислової реструктуризації є нерівномірними, що особливо відчутно в регіонах, залежних від традиційних галузей.

Стратегічний підхід Європейського Союзу орієнтований на формування «зеленої конкурентоспроможної економіки», у якій кліматична політика виступає не лише інструментом екологічного регулювання, а й рушійною силою інноваційного розвитку та підвищення продуктивності. Водночас енергоємні галузі стикаються з додатковим тиском у контексті міжнародної конкуренції, особливо на глобальних ринках, де вимоги щодо скорочення викидів є менш жорсткими. Це зумовлює необхідність балансування між досягненням кліматичних цілей і збереженням промислової конкурентоспроможності [4, с. 51–60].

В Азії економічні наслідки тісно пов'язані з траєкторіями розвитку. Швидка індустріалізація означає, що декарбонізація повинна співіснувати з економічним розширенням та зростанням попиту на енергію. Ключові динаміки включають постійне зростання інфраструктури викопного палива, одночасне розширення потужностей відновлюваної енергетики, високі інвестиції в зелені галузі промисловості, орієнтовані на виробництво, залежність від експортно-орієнтованого промислового зростання (особливо Китаю та В'єтнаму).

На відміну від Європи, де декарбонізація часто передбачає реструктуризацію існуючих галузей промисловості, Азія переживає паралельне

розширення як викопних, так і відновлюваних систем, що призводить до економіки подвійної енергії [5, с. 97–105].

Азія демонструє неоднорідну модель економічного та енергетичного переходу, де високі темпи економічного зростання супроводжуються зростанням попиту на енергію. Китай виступає найбільшим інвестором у відновлення енергетики, тоді як Індія зберігає високу залежність від викопного палива через потреби швидкого економічного розвитку. Японія характеризується низьким темпом зростання енергоспоживання та більш стабільною структурою викидів. Південно-Східна Азія залишається регіоном з високим потенціалом зростання, але також із значною залежністю від традиційної енергетики.

Європа стикається з вищими короткостроковими витратами на перехід, волатильністю цін на енергоносії, повільнішим промисловим зростанням у деяких секторах. Азія переживає вище загальне зростання викидів (в абсолютному вираженні), швидше розширення інфраструктури, сильніше довгострокове зниження витрат на технології відновлюваної енергетики через ефект масштабу.

Порівняльні індикатори декарбонізації промислового сектору в Європі, Китаї, Індії та Південній Кореї дозволяють оцінити різні траєкторії та стадії трансформації промисловості в цих регіонах. Дані у таблиці 2.18. свідчать про суттєве скорочення викидів CO₂ у промисловості Європи (–32 % від рівня 1990 року), що підтверджує ефективність довгострокової кліматичної політики та технологічної модернізації. Натомість Китай та Індія перебувають на етапі індустріального зростання, що супроводжується збільшенням викидів, тоді як Південна Корея демонструє помірне зростання з одночасними зусиллями щодо їх стримування.

А структура «зеленої» промисловості суттєво відрізняється, Китай має найвищу частку експорту зеленої продукції (близько 35 %), що відображає його виробниче та технологічне лідерство, тоді як Європа та Південна Корея демонструють стабільні, але нижчі показники. Рівень впровадження водневих

технологій і проєктів уловлювання вуглецю також варіюється, оскільки Європа та Південна Корея активно розвивають інноваційні рішення, Китай перебуває на стадії масштабування, тоді як Індія лише формує відповідну технологічну базу.

Таблиця 2.18.

Індикатори декарбонізації промисловості

Індикатор	Європа	Китай	Індія	Південна Корея
Скорочення викидів CO ₂ у промисловості з 1990 року	-32%	+85% (фаза зростання)	+120%	+15%
Частка експорту зеленої промисловості	18%	35%	8%	22%
Використання водню в промисловості	Високий (пілотний масштаб)	Середній (розширення)	Низький	Середньо-високий
Проєкти уловлювання вуглецю	140+	90+	20+	30+

Джерело: складено автором за [133]

Можна виділити таким чином різні моделі декарбонізації промисловості: європейську як зрілу та орієнтовану на скорочення викидів, азійську як динамічну, але тісно пов'язану з фазою економічного зростання та індустріалізації.

Європа надає пріоритет електрифікації, зумовленій нормативними актами, включаючи заборону на транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння. Розвиток інфраструктури координується між державами-членами. Азія демонструє більш змішану модель, що створює багатошвидкісний перехід до мобільності, де технологічне лідерство та готовність інфраструктури значно різняться. Європа інтегрує сільське господарство в кліматичну політику за допомогою регуляторних механізмів та субсидій. Азія, навпаки, стикається з більшою залежністю від зайнятості в сільському господарстві та проблемами продовольчої безпеки, що обмежує швидкість скорочення викидів у цьому секторі.

Глобальна декарбонізація значною мірою залежить від співпраці між Європою та Азією, оскільки обидва регіони відіграють центральну роль у викидах, ланцюгах постачання технологій та потоках фінансування кліматичних заходів. Азія, зокрема Китай, домінує у виробництві технологій відновлюваної енергетики, тоді як Європа лідирує в регуляторних інноваціях та моделях управління кліматом.

Це створює взаємну залежність, Європа залежить від азійського виробництва, Азія залежить від європейських регуляторних та фінансових стандартів у світовій торгівлі.

Глобальні ланцюги постачання чистих технологій характеризуються високою концентрацією виробництва в Азії, зокрема в Китаї, яка домінує в ключових сегментах, як сонячній енергетиці, акумуляторах та переробці рідкоземельних елементів. Частка Європейського Союзу залишається обмеженою, переважно у виробництві компонентів з високою доданою вартістю. Така структура створює стратегічну залежність світового енергетичного переходу від азійських виробничих потужностей, водночас підвищуючи ризики концентрації та вразливості глобальних постачальних ланцюгів.

Європейські інституції та банки розвитку відіграють значну роль у фінансуванні кліматичних проектів в Азії. Водночас азійські суверенні фонди та банки розвитку все частіше інвестують у глобальну інфраструктуру відновлюваної енергетики. Це вказує на багатополярну систему фінансування кліматичних заходів зі зростаючим фінансовим впливом Азії.

Міжнародні потоки кліматичного фінансування демонструють зростаючу багатополярність, у якій Європа та Азія виступають ключовими донорами та інвесторами в глобальну енергетичну трансформацію. Європейські інституції, зокрема Європейський інвестиційний банк та програма Global Gateway, орієнтуються на зміцнення партнерств із країнами Азії та Глобального Півдня. Водночас Китай формує один із найбільших позаєвропейських центрів «зеленого» фінансування через об'єднання державних банків та ініціативи «Пояс і шлях». Азійський банк розвитку та суверенні фонди добробуту доповнюють цю архітектуру, забезпечуючи регіональну фінансову підтримку декарбонізації.

2.3. Розвиток процесу декарбонізації в Україні

Історично енергетичний сектор України значною мірою залежав від вугілля, природного газу та ядерної енергетики. Видобуток вугілля та споживання викопного палива становили основу промислової економіки України протягом 20-го століття, що призвело до значних викидів парникових газів та погіршення стану навколишнього середовища. Спадщина енергетичної моделі радянської епохи, яка характеризувалася низькою енергоефективністю та високою вуглецемісткістю, створила структурні виклики для модернізації національної енергетичної системи. Незважаючи на ці виклики, Україна має значний потенціал відновлюваної енергії, включаючи вітрову, сонячну, біомасову та малу гідроенергетику, які можуть служити критичними важелями декарбонізації.

В останні роки Україна дедалі більше узгоджує свої дії з кліматичною політикою Європейського Союзу та глобальними кліматичними угодами, включаючи Паризьку угоду. Прийняття законодавства, узгодженого з ЄС, такого як Національний енергетичний та кліматичний план та Енергетична стратегія України на період до 2035 року, відображає зростаюче політичне та інституційне зобов'язання щодо скорочення викидів парникових газів та переходу до низьковуглецевої економіки. Ці стратегії наголошують не лише на скороченні викидів, але й на модернізації енергетичної інфраструктури, диверсифікації джерел енергії та підвищенні енергоефективності в усіх секторах економіки.

Розвиток процесу декарбонізації в Україні

<i>Алгоритм дослідження розвитку процесу декарбонізації в Україні</i>	1. Історичний контекст декарбонізації в Україні
	1.1. Радянська промислова спадщина та енергетична структура
	1.2. Пострадянський перехід та енергетичні виклики
	1.3. Початкова екологічна обізнаність та політичні заходи
	2. Розробка політики та інституційна база
	2.1. Національні кліматичні зобов'язання
	2.2. Енергетична стратегія та кліматичне планування
	2.3. Інституції управління
	3. Відновлювана енергетика та технологічні інновації
	3.1. Зростання відновлюваних джерел енергії
	3.2. Енергоефективність та розумні технології
	4. Економічні, соціальні та геополітичні наслідки
	4.1. Енергетична незалежність та безпека
	4.2. Соціально-економічні наслідки
	4.3. Громадська обізнаність та громадянське суспільство
	5. Виклики та перспективи
5.1. Фінансові бар'єри	
5.2. Інтеграція інфраструктури та мереж	
5.3. Регуляторні та інституційні обмеження	
5.4. Перспективи інновацій	

Рис. 2.20. Розвиток процесу декарбонізації в Україні

Джерело: побудовано автором

Процес декарбонізації в Україні неможливо повністю зрозуміти, не розглядаючи його в контексті історичного розвитку країни. Декарбонізація – системне скорочення викидів вуглекислого газу та інших парникових газів, в Україні формується промисловою спадщиною, економічною трансформацією після радянської епохи та зміною рівня екологічної обізнаності та політичних дій. Історичний контекст енергетичної та екологічної траєкторії України

зосереджується на радянській промисловій спадщині та енергетичній структурі, пострадянському перехідному періоді та енергетичних проблемах, а також ранньому виникненні екологічних проблем та політичних заходів щодо скорочення викидів.

За радянських часів Україна була головним промисловим центром, особливо у вугільній, металургійній, хімічній та важкій промисловості. Донецький басейн (Донбас) та Кривий Ріг стали центрами видобутку вугілля та виробництва сталі відповідно, формуючи основу промислової економіки України. Вугільні теплові електростанції виробляли більшу частину електроенергії, доповнюючи їх нафтою, природним газом та атомною енергією з таких електростанцій, як Запорізька та Рівненська АЕС [1, с. 45–52].

Радянська промислова модель надавала пріоритет виробництву та економічному зростанню над енергоефективністю та захистом навколишнього середовища. Електростанції працювали з низькою тепловою ефективністю, а промислові заводи споживали велику кількість викопного палива з мінімальним відновленням відходів. До кінця 1980-х років енергоємність України була однією з найвищих у Європі, споживаючи до 2,5 разів більше енергії на одиницю ВВП, ніж країни Західної Європи [2, с. 88–94].

Промислове забруднення та викиди були зосереджені в місько-промислових регіонах, що призводило до серйозного забруднення повітря та води. Наприклад, у Донецьку та Луганську рівень PM_{2.5} значно перевищував безпечні порогові значення, а забруднення важкими металами вплинуло на річки та ґрунт. Атомна енергетика також сприяла екологічним та соціальним ризикам, що підкреслила Чорнобильська катастрофа 1986 року, яка виявила недоліки в управлінні безпекою та людські втрати енергоємної промислової політики [1, с. 45–52].

Таблиця 2.19

Викиди парникових газів (ПГ) в Україні (2015–2020)

Рік	Викиди ПГ (кТ СО ₂ -екв.)	Зміна (%)
2015	274 000*	–
2016	259 000*	–5,5%*
2017	235 470	–9,2%
2018	246 996	+4,8%
2019	236 095	–4,4%
2020	227 342	–3,7%

* Дані за 2015–2016 роки є приблизними та базуються на інтерполяції в наборі даних Macrotrends.

Джерело: складено автором за [136]

Як видно з табл. 2.19., у 2015–2020 роках в Україні спостерігається загальна тенденція до скорочення викидів парникових газів. Найбільше зниження зафіксовано у 2017 році (–9,2%), що пов'язано зі спадом промислового виробництва та частковою трансформацією енергетичного сектору. У 2018 році відбулося тимчасове зростання викидів (+4,8%), що свідчить про нестабільність процесів декарбонізації. Загалом динаміка відображає збереження структурної залежності від викопного палива. Вугільні регіони економічно залежали від однієї галузі промисловості, що обмежувало диверсифікацію та збільшувало вразливість до енергетичних переходів. Енергетична система була централізованою та тісно пов'язаною з ширшою радянською мережею, що ускладнювало будь-які спроби модернізації або зменшення вуглецевої інтенсивності незалежно.

Таблиця 2.20.

Викиди СО₂ в Україні (2015–2023 рр.)

Рік	Викиди СО ₂ (тонни)	Річна зміна (%)	СО ₂ на душу населення (т)
2015	221 594 820	–16,4%	4,84
2016	221 961 180	+0,17%	4,87
2017	200 128 030	–9,84%	4,40
2018	213 681 370	+6,77%	4,73
2019	201 526 870	–5,69%	4,48
2020	192 013 790	–4,72%	4,30
2021	180 507 850	–5,99%	4,07
2022	132 541 470	–26,57%	3,23
2023*	≈121 000 000	–	–

Примітка: * Дані за 2023 рік є оцінковими.

Джерело: складено автором за [137, 138]

Дані табл. 2.20 підтверджують довгострокову тенденцію до зниження викидів CO₂, особливо різке скорочення у 2022 році (–26,57%), що пов'язано з воєнними діями, скороченням промислового виробництва та зменшенням енергоспоживання. Зниження показника викидів на душу населення також свідчить про структурні зміни в економіці.

Вугільні регіони економічно залежали від однієї галузі промисловості, що обмежувало диверсифікацію та збільшувало вразливість до енергетичних переходів. Енергетична система була централізованою та тісно пов'язаною з ширшою радянською мережею, що ускладнювало будь-які спроби модернізації або зменшення вуглецевої інтенсивності незалежно.

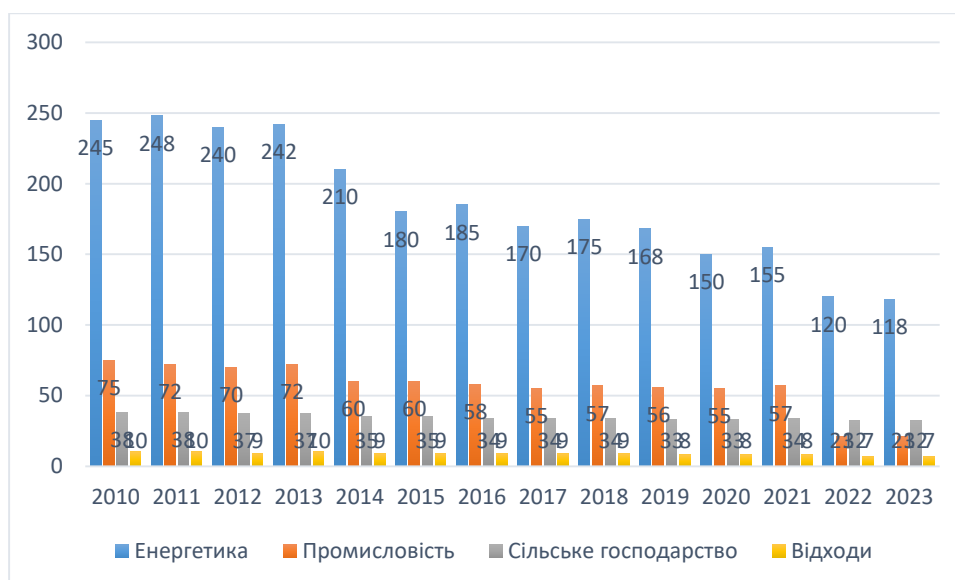


Рис. 2.21. Секторальна структура викидів 2010–2023 (Mt CO₂-eq)

Джерело: побудовано автором

Здобуття Україною незалежності в 1991 році ознаменувало початок бурхливого пострадянського переходу. Успадкована енергетична система, яка значною мірою залежала від викопного палива та застарілої інфраструктури, зіткнулася зі структурною неефективністю, що посилювалася економічним спадом. Промислове виробництво різко скоротилося на початку 1990-х років; важка промисловість та видобуток вугілля скоротилися більш ніж на 40% у деяких

регіонах, що тимчасово зменшило споживання енергії, але не змогло вирішити системну неефективність [2, с. 112–118].

Енергетична залежність була серйозною проблемою. Україна значною мірою залежала від імпортованого природного газу, переважно з Росії, на який припадало понад 70% внутрішнього споживання в 1990-х роках. Неодноразові суперечки щодо ціноутворення та постачання газу виявили вразливість як в енергетичній безпеці, так і в економічній стабільності. Залежність від викопного палива створила подвійну проблему: високий рівень викидів вуглецю та геополітичну вразливість.

Виробництво електроенергії та тепла залишалося вуглецеємним. Вугільні та газові теплові електростанції зробили найбільший внесок у викиди, тоді як атомна енергетика, хоча й працює вуглецево-нейтрально, зіткнулася з проблемами безпеки та старіння інфраструктури. Опалення сільських районів та житлових приміщень залежало від природного газу та низькоефективних котлів, що сприяло забрудненню міст. Ціноутворення на енергоносії значною мірою субсидувалося, що перешкоджало підвищенню ефективності та інвестиціям у модернізацію [2, с. 112–118].

Пострадянське регуляторне середовище було недостатньо розвиненим. Реформи енергетичного ринку, зусилля з приватизації та правова база впроваджувалися поступово, але їх дотримання залишалося непослідовним. Інституційні слабкості, бюрократичні перешкоди та неповна лібералізація ринку гальмували ініціативи з декарбонізації.

Економічні та соціальні труднощі під час перехідного періоду вплинули на ставлення громадськості до енергетики та довкілля. З інфляцією, безробіттям та зниженням рівня життя екологічні проблеми часто були другорядними порівняно з безпосереднім економічним виживанням. Тим не менш, ці труднощі підкреслили важливість енергетичної безпеки, опосередковано мотивуючи інтерес до альтернативних та вітчизняних джерел енергії.

Хоча екологічні проблеми не були пріоритетними у 1990-х роках, обізнаність поступово зростала завдяки науковим дослідженням, громадській захисній діяльності та міжнародній участі. Екологічні неурядові організації та академічні установи почали висвітлювати наслідки забруднення повітря та води, неефективного використання енергії та промислових викидів. Увага громадськості посилилась після гучних подій, таких як Чорнобильська катастрофа та локальні промислові аварії.

Міжнародний вплив відіграв ключову роль. Україна приєдналася до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (РКЗК ООН) та ратифікувала Кіотський протокол у 2004 році. Ці зобов'язання познайомили Україну з глобальними механізмами звітності про викиди та ринку вуглецю. Хоча початкові зобов'язання були умовними та гнучкими, участь сигналізувала про початок інституційної інтеграції з міжнародним управлінням кліматом [3, с. 8–13].

На внутрішньому рівні почали з'являтися ранні законодавчі та політичні заходи. Закони про охорону навколишнього середовища на початку 2000-х років стосувалися контролю забруднення, оцінки впливу на навколишнє середовище та збереження ресурсів. Реформи енергетичної політики, такі як лібералізація ринку електроенергії, були спрямовані на довгострокове підвищення ефективності. Пілотні проекти, що підтримувалися міжнародними фінансовими установами, такими як Світовий банк та Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР), запроваджували ініціативи щодо відновлюваної енергетики та програми енергоефективності. Ці ранні програми продемонстрували потенціал інтеграції цілей декарбонізації в економічне та енергетичне планування.

Таблиця 2.21

Частка відновлюваної енергії в загальному кінцевому споживанні енергії (2015–2020 рр.)

Рік	Частка (%)
2015	5,0
2016	5,9
2017	6,7
2018	7,0
2019	8,1
2020	9,2

Джерело: Державна служба статистики України <http://www.ukrstat.gov.ua/>

Як видно з табл. 2.21, частка ВДЕ стабільно зростає, що відображає перші успіхи декарбонізації та поступове впровадження відновлюваної енергетики.

Структуру та динаміку встановлених потужностей ВДЕ наведено в таб. 4

Таблиця 2.22

Встановлена потужність відновлюваної енергетики за типом (2015–2021 рр., МВт)

Рік	Вітрова	Сонячна	Гідро	Біомаса/Біогаз	Загальна
2015	426	432	6048	52	6958
2016	438	531	6048	56	7073
2017	465	742	6048	73	7328
2018	533	1388	6048	98	8067
2019	1170	4925	6048	125	12268
2020	1314	6094	6048	204	13660
2021	1673	6227	6523	276	14699

Джерело: складено на основі <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>

З табл. 2.22 видно, що найбільш стрімкий ріст спостерігається у сонячній та вітровій енергетиці, що підтверджує поступове зростання інвестицій у відновлювані джерела енергії та зменшення залежності від викопного палива.

Освітні кампанії, часто підтримувані неурядовими організаціями, підвищили обізнаність громадськості про сталу енергетику та зміну клімату. Громади почали виступати за чистіші технології та заходи енергоефективності в плануванні місцевого самоврядування. Хоча ці зусилля були обмеженими за масштабом, вони

створили соціальну та політичну основу, необхідну для більш комплексної політики декарбонізації в наступні десятиліття.

Декарбонізація в Україні зумовлена не лише структурними економічними трансформаціями та технологічними змінами, але й динамічним політичним середовищем, що формується міжнародними угодами, національними документами планування та багаторівневими інституціями управління. Перехід до низьковуглецевої економіки вимагає узгодженої системи, яка визначає кліматичні зобов'язання, узгоджує енергетичні та кліматичні стратегії, а також створює ефективні керівні інституції для реалізації дій. У цьому розділі розглядаються національні кліматичні зобов'язання України, еволюція енергетичної стратегії та кліматичного планування, а також інституційна архітектура, яка регулює політику декарбонізації.

Офіційна участь України в міжнародному управлінні кліматом розпочалася з ратифікації Кіотського протоколу та значно поглибилася з приєднанням до Паризької угоди. Після подання свого першого Національно визначеного внеску (НДВ) у 2016 році та оновленої версії у 2021 році, Україна просунула свою кліматичну політику, погодившись на більш амбітні цілі у своєму другому НДВ (2031–2035), поданому у листопаді 2025 року. Згідно з цим оновленим зобов'язанням, Україна зобов'язується скоротити викиди парникових газів більш ніж на 65% до 2035 року порівняно з рівнями 1990 року, охоплюючи всі гази та сектори, включені до національного кадастру, та узгоджуючи їх з довгостроковою метою кліматичної нейтральності до середини століття [1, с. 1–2].

Оновлений НДВ включає пріоритети пом'якшення наслідків, такі як розширення частки відновлюваної енергії, поступова відмова від вугільної енергетики, декарбонізація промисловості, підвищення енергоефективності та впровадження низьковуглецевих технологій. Він також включає стратегії адаптації, зосереджені на стійкій інфраструктурі, водній безпеці та кліматично розумному сільському господарстві. Таке узгодження пом'якшення наслідків зміни клімату та

адаптації сигналізує про намір України збалансувати економічну відбудову зі стійкістю до зміни клімату, особливо в контексті поточної геополітичної ситуації та потреб у відбудові [1, с. 3–7].

Національні кліматичні зобов'язання вбудовані в ширші рамки управління через Закон України про клімат, який встановлює довгострокові цілі кліматичної нейтральності та забезпечує правову основу для інтеграції кліматичної політики в національне законодавство та управління [2, с. 10–14]. Згідно з урядовими повідомленнями, розробка кліматичної політики враховує виклики, пов'язані з війною, та прагне інтегрувати цілі декарбонізації зі стратегіями відновлення та розвитку, щоб забезпечити безперервність дій щодо зміни клімату за надзвичайних умов.

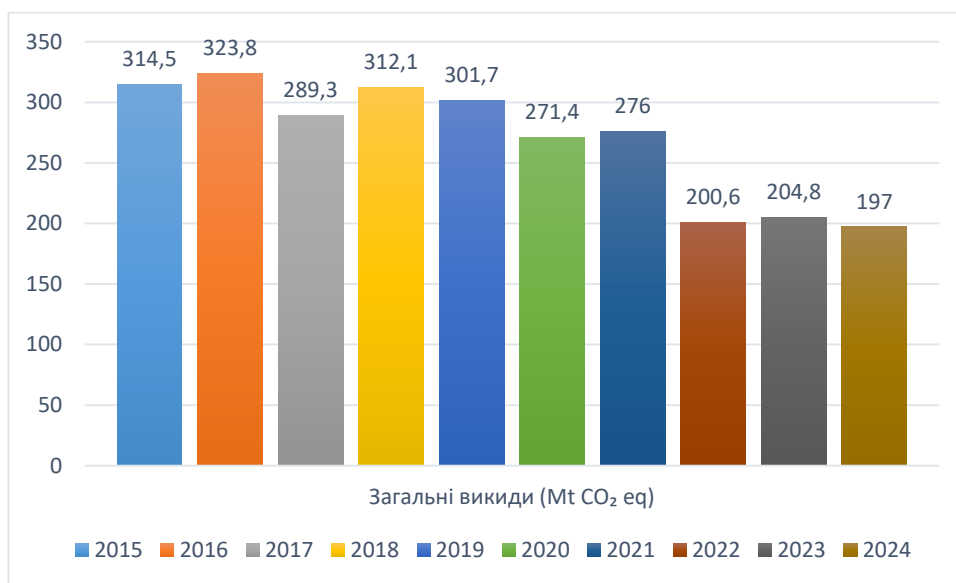


Рис. 2.22. Динаміка викидів парникових газів в Україні (2015–2024)

Джерело: складено автором за Дані з національного реєстру викидів України [Ecopolitic.com.ua](https://ecopolitic.com.ua) Згідно з офіційним звітом України за 2025 р. [MOEPR.gov.ua](https://moep.gov.ua)

Ключовою віхою в архітектурі політики декарбонізації України є прийняття Національного енергетичного та кліматичного плану (НПЕК) на період до 2030 року, затвердженого Кабінетом Міністрів 25 червня 2024 року. НПЕК є першим

інтегрованим стратегічним документом, що об'єднує цілі енергетичного, кліматичного та економічного планування в єдину структуру.

Основні цілі НПЕК:

- Скорочення викидів ПГ на $\geq 65\%$ від рівня 1990 р.
- Частка ВДЕ у кінцевому споживанні енергії — 27% до 2030 р.
- Диверсифікація енергопостачання: не більше 30% від одного постачальника
- Питтєві цілі енергоефективності та зменшення первинного та кінцевого споживання (тН)

Таблиця 2.23

Цільові показники кліматичної та енергетичної політики України

Ціль	Термін	Документ / Джерело
Зменшення викидів ПГ $\geq 65\%$ від рівня 1990	2035	Оновлений NDC України Enerdata
Відмова від вугілля у виробництві е/е	2035	NECP IEF.org.ua
Частка ВДЕ у кінцевому енергоспоживанні 27%	2030	NECP / інтегроване кліматичне планування IEF.org.ua
Зменшення викидів метану 30% (від рівня 2020)	2030	NECP (цілі щодо метану) IEF.org.ua
Кліматична нейтральність (довгострокова)	2050	Другий NDC / Паризька угода Enerdata

Цей план був розроблений відповідно до Регламенту ЄС 2018/1999 та відображає найкращі європейські практики в галузі кліматичного та енергетичного планування. Він також відповідає зобов'язанням України як договірної сторони Договору про Енергетичне співтовариство та підтримує процес вступу країни до ЄС шляхом узгодження національних цілей з європейськими кліматичними та енергетичними цілями.

НПЕК визначає кілька основних цілей для спрямування декарбонізації та сталої енергетичної трансформації до 2030 року. Ключові цілі включають:

- Скорочення викидів парникових газів на 65% порівняно з рівнями 1990 року, що посилює амбіції України на траєкторії NDC.
- 27% частка відновлюваної енергії в загальному кінцевому споживанні енергії до 2030 року та посилення інтеграції технологій відновлюваної енергії в енергетичні сектори.
- Диверсифікація енергопостачання, обмеження залежності від будь-якого єдиного постачальника до не більше 30%.
- Питтові цілі споживання енергії для первинного та кінцевого використання енергії, виміряні в тоннах нафтового еквіваленту (тнн), забезпечення енергоефективності та зниження зростання попиту.

НПЕК також описує конкретні політичні заходи щодо декарбонізації, включаючи модернізацію енергетичної інфраструктури, сприяння енергоефективності, розширення потужностей відновлюваної енергії та підтримку інтелектуальних мереж і технологій зберігання. У плані окреслено значні інвестиційні потреби, які оцінюються в понад 41,5 млрд доларів США, для фінансування ініціатив з декарбонізації, стимулювання зеленого переходу та залучення міжнародної підтримки для реалізації.

Нещодавні оновлення управління включають єдину процедуру підготовки та оновлення НПЕК, прийняту в січні 2026 року, яка інституціоналізує регулярні цикли перегляду кожні п'ять років та структуровані консультації із зацікавленими сторонами, включаючи участь громадськості та зворотний зв'язок від Секретаріату Енергетичного Співтовариства. Ця процедурна база посилює прозорість та оперативність у плануванні та впровадженні.

Процес декарбонізації в Україні підтримується багаторівневою інституційною структурою, яка поєднує урядові міністерства, дорадчі органи, експертні ради, міжнародних партнерів та громадянське суспільство.

Основним є Міністерство охорони навколишнього середовища та природних ресурсів, яке відповідає за розробку політики щодо зміни клімату, нагляд за її

впровадженням, звітування перед міжнародними структурами та координацію міжгалузевих зусиль з інтеграції політики. Це міністерство відіграє провідну роль у гармонізації національних кліматичних цілей з європейськими стандартами та міжнародними зобов'язаннями [2, с. 15–18].

Міністерство економіки та Міністерство енергетики є ключовими партнерами в енергетичному та кліматичному плануванні, зокрема у підготовці таких документів, як НПЕК, структуруванні енергетичної політики та координації взаємодії з багатьма зацікавленими сторонами. Ці міністерства співпрацюють з вітчизняними експертами, міжнародними органами, такими як Секретаріат Енергетичного співтовариства та Європейська комісія, а також з аналітичними центрами, забезпечуючи, щоб стратегічні документи відображали як національні пріоритети, так і передовий міжнародний досвід.

Таблиця 2.24

Встановлені потужності ВДЕ в Україні (МВт)

Технологія	2015	2018	2021	2024	2025
Сонячна енергетика	432	1 388	6 094	6 800–7 000 ¹	—
Вітрова енергетика	426	533	1 673	~1 900 ²	~2 300 ³
Малі ГЕС	87	99	121	~120	—
Біомаса/Біогаз	35	52	152	~150	—
Разом	~980	~2 072	~8 173	~9 170 ⁴	8–9+ ГВт

Джерело: побудовано автором *Примітки:*

¹ Оцінка сонячних проектів UkraineInvest.gov.ua

² Дані про вітрову енергетику [Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_Ukraine)

³ Прогнозована потужність вітру 2025 Ecopolitic.com.ua

⁴ Сумарна потужність ВДЕ UkraineInvest.gov.ua

Незалежні консультативні та експертні органи, такі як Офіс зеленого переходу, відіграють вирішальну роль у зміцненні управління кліматом, підтримці розробки комплексної політики, консультуванні щодо заходів декарбонізації та координації технічної допомоги. Цей офіс співпрацює з глобальними мережами та заходами, такими як COP30, для вдосконалення підходів до управління кліматом та просування політики, заснованої на доказах.

Громадянське суспільство, дослідницькі установи та місцеві органи влади роблять свій внесок в екосистему управління, беручи участь у консультаціях, моніторингу впровадження та пілотуванні ініціатив з декарбонізації на регіональному рівні. Такі організації, як екологічні неурядові організації та міські ради у великих містах (наприклад, у Києві та Львові), відіграють важливу роль у формуванні місцевих планів дій щодо клімату та просуванні проектів сталого розвитку, керованих громадами.

Міжнародні донорські організації та банки розвитку, включаючи Делегацію ЄС в Україні, Світовий банк, ЄБРР, ЄІБ, USAID, ПРООН та інші, надають необхідну фінансову та технічну підтримку проектам декарбонізації. Їхня участь допомагає подолати національні прогалини у фінансуванні, узгодити внутрішню політику з міжнародними стандартами, а також сприяє інноваціям та розбудові потенціалу в галузі низьковуглецевих технологій та структур управління.

Декарбонізація залежить не лише від національної кліматичної політики та інституційного планування, але й від впровадження технологій відновлюваної енергетики та сучасних енергозберігаючих інновацій. Для України розширення потужностей відновлюваної енергетики та впровадження розумних технологій і енергоефективних рішень є як стратегічною відповіддю на кліматичні цілі, так і засобом підвищення енергетичної безпеки, особливо в контексті триваючої повномасштабної війни. У цьому розділі розглядається зростання відновлюваних джерел енергії та роль енергоефективності та розумних технологій у процесі декарбонізації України.

Протягом останнього десятиліття сектор відновлюваної енергетики України продемонстрував значне зростання, зумовлене політичними стимулами, такими як «зелені тарифи», аукціонні схеми та міжнародні інвестиції. Встановлена потужність відновлюваної енергетики швидко зростає з менш ніж 1 ГВт у 2015 році до майже 9 ГВт на початку 2024 року, незважаючи на руйнівний вплив війни на інфраструктуру

та інвестиційні потоки [1, с. 45–46]. Сонячна енергія та енергетика вітру були основними рушійними силами цього розширення.

Приватні та міжнародні інвестиції мають вирішальне значення. В останні роки такі інвестори, як ДТЕК, Elementum Energy, Octopus Energy та європейські фінансові установи, спрямували значний капітал (понад 10 мільярдів євро за деякими даними) в українські проекти відновлюваної енергетики, як комунальні, так і розподілені.

Більше того, технології накопичення енергії, включаючи великі акумуляторні системи, почали відігравати центральну роль у гнучкості та стійкості мережі, особливо після воєнних перебоїв у роботі інфраструктури передачі.

Декарбонізація також залежить від скорочення споживання енергії шляхом підвищення ефективності. Українська влада інтегрувала політику енергоефективності в кліматичні рамки, зосереджуючись на модернізації житлового, промислового та державного секторів як способі зменшення викидів та зниження попиту на енергію.

Ключові політики та стратегії включають:

- Стратегію розвитку розподіленої генерації до 2035 року, спрямовану на розширення децентралізованих установок відновлюваної енергії та підвищення ефективності за рахунок місцевої генерації.
- Концепцію впровадження розумної мережі до 2035 року, яка встановлює дорожню карту для цифрової мережевої інфраструктури, що дозволяє краще реагувати на попит, зменшувати втрати та покращувати інтеграцію змінних відновлюваних джерел енергії.
- Дорожню карту розумної мережі (2024), яка детально описує технологічні оновлення та стандарти модернізації мережі.
- Енергоефективні технології, такі як світлодіоди, високоефективне промислове обладнання, ізоляція будівель та сучасні електроприводи,

все частіше впроваджуються за підтримки державних та приватних стимулів.

Технології розумних мереж мають вирішальне значення для декарбонізації, забезпечуючи ефективне балансування навантаження, зменшення втрат при передачі та інтеграцію розподілених енергетичних ресурсів. Завдяки цифровізації та автоматизації, розумні мережі сприяють моніторингу в режимі реального часу, прогнозуванню попиту та оптимізованому розподілу ресурсів [turn0search6]. Ці системи допомагають подолати проблеми, спричинені високою часткою змінної відновлюваної енергії (сонячної та вітрової), підвищуючи гнучкість та стійкість мережі.

Дахові сонячні установки та інші розподілені енергетичні системи (наприклад, громадські сонячні системи, схеми для споживачів) є частиною стратегії України щодо підвищення енергетичної автономії та зменшення залежності від централізованої генерації, що було особливо важливим враховуючи пошкодження великих електростанцій та мереж передачі під час воєнного часу.

Згідно з нещодавніми дослідженнями, Україна має значний потенціал дахових сонячних фотоелектричних систем (понад 230 ГВт), який значно перевищує поточні встановлені потужності та представляє майбутню можливість для децентралізованої декарбонізації.

Довгострокові тенденції технологічних інновацій включають системи накопичення енергії та виробництво зеленого водню, які стали ключовими темами в літературі про низьковуглецеве майбутнє України. Дослідження показують, що інтеграція накопичення енергії з відновлюваними джерелами енергії та вивчення шляхів розвитку зеленого водню можуть ще більше покращити результати декарбонізації

Таблиця 2.25

Частка відновлюваної енергії у кінцевому енергоспоживанні України (%)

Рік	Частка ВДЕ у кінцевому енергоспоживанні (%)
2015	5,0 %
2016	5,9 %
2017	6,7 %
2018	7,0 %
2019	8,1 %
2020	9,2 %
2021	дані не оприлюднюються
2022	дані не оприлюднюються
2023	дані не оприлюднюються

Джерело: Державна служба статистики України, SDG Indicator 7.3.1 — частка енергії з відновлюваних джерел у загальному енергоспоживанні в Україні (2015–2020) (дані 2021–2023 не оприлюднюються через вплив воєнного стану на звітність).

Таблиця 2.26

Встановлені потужності відновлюваної енергетики в Україні (MW, 2015–2021)

Рік	Вітрові (MW)	Сонячні (MW)	Малі ГЕС (MW)	Біомаса/Біогаз (MW)	Загальна встановлена потужність (MW)
2015	426	432	87	35	999
2016	438	531	90	39	1 098
2017	465	742	95	39	1 341
2018	533	1 388	99	52	2 072
2019	1 170	4 925	114	55,9	6 265
2020	1 314	6 094	116	91	7 615
2021	1 673	6 227	121	152	8 173

Джерело: Renewable energy in Ukraine, Wikipedia — історичні дані по встановлених потужностях по 2021 рік.

Таблиця 2.26

Частка відновлюваних джерел енергії у виробництві електроенергії в Україні в умовах трансформаційних змін (2019–2025 рр.)

Рік	Частка ВДЕ у виробництві електроенергії (%)	Коментар
2019	≈3,7 %	історичні дані
2023	≈22 %	включаючи гідро
2025	≈10,7 %	відновлювані джерела (без великих гідро)

Джерело: побудовано автором за [146]

Процес декарбонізації в Україні має далекосяжні наслідки, які виходять за рамки екологічної стійкості. Він суттєво впливає на енергетичну незалежність,

економічний розвиток, соціальну стабільність та геополітичне позиціонування. Особливо після 2014 року та особливо після повномасштабного вторгнення у 2022 році, декарбонізація стала тісно пов'язана з питаннями національної безпеки, економічної стійкості та інтеграції в європейські структури. У цьому розділі розглядаються аспекти енергетичної безпеки, соціально-економічні наслідки та роль громадської обізнаності та громадянського суспільства у формуванні траєкторії декарбонізації України.

Енергетична незалежність є одним із центральних рушійних сил стратегії декарбонізації України. Історично склалося так, що Україна значною мірою залежала від імпорту викопного палива, зокрема природного газу. Однак геополітична напруженість та війна загострили необхідність диверсифікації джерел енергії та зменшення зовнішньої залежності.

За останніми даними, енергетична система України зазнала значної шкоди: до 2024–2025 років понад 60% генеруючих потужностей було знищено, пошкоджено або зайнято, що підкреслює вразливість централізованої інфраструктури викопного палива [1, с. 12–14]. Водночас ця криза каталізувала перехід до децентралізованих систем відновлюваної енергетики, які менш вразливі до масштабних атак та збоїв [1, с. 15–17].

Війна також суттєво змінила моделі споживання енергії. Попит на електроенергію в промисловості знизився приблизно на 50%, тоді як споживання домогосподарств зменшилося приблизно на 20%, що відображає економічне скорочення та переміщення населення [2, с. 3–5]. Водночас Україна дедалі більше залежить від імпорту електроенергії з європейських мереж та диверсифікованих маршрутів постачання палива.

Таблиця 2.27

Ключові показники енергетичної безпеки України (2015–2026 рр.)

Індикатор	2015	2021	2023	2025–2026
Залежність від імпортованого газу	Високий	Помірний	Зменшений	Диверсифікований імпорт (ЄС, ЗПГ)
Внутрішні виробничі потужності	Стабільний	Стабільний	Сильно пошкоджений	~1/3 довоєнної потужності
Імпорт електроенергії з ЄС	Низький	Помірний	Збільшений	Доступно до ~2 ГВт
Споживання газу (млрд куб. м)	~30	30.3	~25	~21 (2025)

Джерело: побудовано автором за [2]; [3]; [4]

Останні дані (табл.2.27) показують, що споживання газу зменшилося з 30,3 млрд куб. м у 2021 році до приблизно 21 млрд куб. м у 2025 році, що відображає як підвищення ефективності, так і економічне скорочення. Це зниження також свідчить про структурну трансформацію в бік зниження енергоємності.

Водночас, геополітичні події, такі як припинення транзиту російського газу через Україну у 2025 році, переосмислили регіональні енергетичні відносини та посилили узгодженість України з європейськими енергетичними ринками [5, с. 8–10].

Процеси декарбонізації в Україні мають системний характер і тісно переплітаються з питаннями енергетичного суверенітету та національної безпеки. Вони передбачають поступовий перехід до децентралізованої моделі енергогенерації, що базується на розвитку локальних джерел енергії та підвищенні ролі відновлюваних ресурсів. Важливим напрямом виступає також інтеграція української енергосистеми до європейського енергетичного простору, зокрема через синхронізацію з ENTSO-E, що сприяє підвищенню стабільності постачання та диверсифікації енергетичних потоків. Одночасно реалізується стратегія поступового зниження залежності від викопного палива, що має як економічне, так і геополітичне значення.

Декарбонізація супроводжується складними соціально-економічними трансформаціями. Вона потребує значних інвестицій у модернізацію

інфраструктури, впровадження нових технологій та підтримку регіонів, залежних від традиційних енергетичних галузей, що створює додаткове фінансове навантаження, але відкриваються нові можливості для розвитку «зеленої» економіки, створення робочих місць у секторі відновлюваної енергетики, підвищення енергоефективності та залучення міжнародних інвестицій. У цьому контексті декарбонізація виступає не лише як екологічний виклик, а як важливий фактор структурної перебудови економіки України, спрямованої на досягнення стійкого та інноваційного розвитку.

Таблиця 2.28

Соціально-економічні показники, пов'язані з декарбонізацією

Індикатор	Значення / Тенденція
Зміна ВВП (після 2022 року)	~-20 % порівняно з довоєнним рівнем
Потреби у реконструкції	~524 млрд доларів США
Пошкодження енергетичної інфраструктури	+70 % зростання (оцінки на 2024–2025 роки)
Промисловий попит на електроенергію	-50 %
Вплив на зайнятість (промисловість)	Під загрозою втрата тисяч робочих місць

Джерело: побудовано автором за [6]; [7]; [2]

Декарбонізація також взаємодіє з існуючими регіональними диспропорціями. Промислові регіони (наприклад, Донбас) стикаються з більшими проблемами через залежність від вугілля та важкої промисловості, тоді як західні регіони демонструють більший потенціал для розвитку відновлюваної енергетики [8, с. 20–24].

Це створює потребу в політиці «справедливого переходу», що забезпечує:

- перепідготовку працівників з секторів викопного палива;
- регіональні інвестиційні програми;
- механізми соціального захисту.

Роль громадянського суспільства у процесах декарбонізації набуває дедалі більшого значення, виступаючи важливим каталізатором трансформацій як на національному, так і на локальному рівнях. Зокрема, через інформаційно-просвітницьку діяльність громадські ініціативи сприяють підвищенню рівня кліматичної обізнаності населення, формуванню екологічно відповідальної

поведінки та активному залученню громадян до реалізації кліматичної політики. Такий вплив є критично важливим для забезпечення суспільної підтримки декарбонізаційних реформ і зміни моделей споживання енергії.

Важливим напрямом участі громадянського суспільства є розвиток енергетичних спільнот, які забезпечують виробництво та споживання відновлюваної енергії на місцевому рівні. Це сприяє децентралізації енергетичних систем, підвищенню їхньої стійкості та зменшенню втрат під час передачі енергії. Одночасно неурядові організації виконують функцію незалежного моніторингу державної політики, забезпечують громадський контроль за виконанням кліматичних зобов'язань та виступають провідниками реформ у сфері екологічного регулювання.

Суттєву роль у реалізації декарбонізаційних заходів відіграють також органи місцевого самоврядування, які впроваджують плани сталого енергетичного розвитку, адаптовані до специфіки територій, що показано у таблиці 2.29. Саме на цьому рівні відбувається практична імплементація багатьох кліматичних ініціатив, включаючи підвищення енергоефективності будівель, розвиток локальних джерел відновлюваної енергії та модернізацію інфраструктури.

Таблиця 2.29

Роль громадянського суспільства в декарбонізації

Область	Внесок
Інформаційні кампанії	Кліматична освіта, залучення громадськості
Енергетичні спільноти	Виробництво місцевої відновлюваної енергії
Неурядові організації та адвокація	Моніторинг політики та просування реформ
Місцеві органи влади	Впровадження планів сталого енергопостачання

Енергетична криза також вплинула на моделі поведінки. Через відключення електроенергії та дефіцит енергії домогосподарства все частіше впроваджують:

- енергозберігаючі методи;
- маломасштабні установки відновлюваної енергії;
- альтернативні джерела енергії (генератори, сонячні панелі).

Ці зміни демонструють, як адаптація суспільства підтримує цілі декарбонізації, навіть в кризових умовах.

Попри досягнуті результати у розвитку відновлюваної енергетики та становленні інституційної бази кліматичної політики, процес декарбонізації в Україні супроводжується низкою глибинних системних викликів, що обумовлюють його складний і нерівномірний характер. Серед ключових обмежень варто виокремити дефіцит фінансових ресурсів, який стримує масштабування інвестицій у «зелену» генерацію та модернізацію енергетичної інфраструктури, а також значні втрати виробничих потужностей і пошкодження критичної інфраструктури внаслідок воєнних дій. Додатковим фактором є необхідність технологічної та регуляторної адаптації до стандартів Європейського Союзу, що потребує комплексної трансформації енергетичного ринку, підвищення прозорості регулювання та гармонізації нормативно-правової бази.

Зазначені виклики формують і нові можливості для структурного оновлення економіки. Відбудова енергетичного сектору створює передумови для впровадження сучасних низьковуглецевих технологій, розвитку децентралізованої генерації та підвищення енергоефективності. Інтеграція до європейського енергетичного простору відкриває доступ до фінансових ресурсів, інновацій та спільних інфраструктурних проєктів, що сприяє прискоренню декарбонізаційних процесів. Поточний етап розвитку України можна розглядати як критичну точку переходу, де поєднання викликів і можливостей визначає траєкторію формування сучасної, стійкої та конкурентоспроможної низьковуглецевої економіки.

Висновки до 2 розділу.

Аналіз макрозв'язків у логарифмічній формі підтверджує обернену залежність між ВВП на одну особу та вуглецевою інтенсивністю: економіки з вищим рівнем доходу, як правило, створюють одиницю доданої вартості за нижчого вуглецевого навантаження. Така закономірність емпірично узгоджується з

трактуванням декарбонізації як підвищення ресурсоефективності та технологічної й організаційної результативності. Водночас наявність цілі нульових викидів не забезпечує чіткого розмежування підгруп у наявних даних. Розподіли показників істотно перекриваються, особливо серед країн із низьким і середнім доходом, де структура енергетики, технологічний рівень і стартові умови зумовлюють значну варіативність результатів. Це свідчить, що задекларована ціль у межах наявних спостережень швидше корелює з інституційною спроможністю та структурою економіки, ніж виступає самодостатнім детермінантом поточної вуглецевої ефективності.

Сценарні траєкторії викидів до 2050 року характеризуються спадною медіанною динамікою та широким міжквартильним діапазоном, що відображає відмінності у вихідних рівнях викидів, темпах трансформації та параметрах задекларованих цілей. Поділ за наявністю цілі нульових викидів у середньому узгоджується з більш вираженим скороченням у підгрупі з ціллю, однак міжквартильні інтервали істотно перекриваються. Відтак отримані результати доцільно інтерпретувати як описове узгодження доступних даних і загальну спрямованість змін, а не як підтвердження причинного впливу самих декларацій.

Декарбонізація дедалі більше стає геополітичним питанням. Конкуренція за критично важливі мінерали (літій, кобальт, рідкісноземельні елементи), лідерство у відновлюваних технологіях та ринки водню формують міжнародні відносини. Однак також спостерігається зростання співпраці через рамки Паризької угоди, кліматичні ініціативи G20, двосторонні партнерства у сфері зелених технологій.

Майбутнє глобальної декарбонізації визначатиметься взаємодією між технологічними інноваціями, геополітичною конкуренцією, фінансовою реструктуризацією та ескалацією кліматичних ризиків. Очікується, що як Європа, так і Азія залишатимуться центральними учасниками цього процесу, але їхні траєкторії дедалі більше збігатимуться через глобальні ланцюги поставок, механізми регулювання викидів вуглецю та міжнародні рамки управління

кліматом. Водночас перехід стане складнішим через зростання системних витрат, обмеження ресурсів та нерівномірну динаміку розвитку.

Глобальний виклик зміни клімату трансформував енергетичну політику, економічні стратегії та екологічне управління в усьому світі. Концепція декарбонізації як систематичного скорочення викидів вуглекислого газу від виробництва енергії, промислової діяльності та транспорту, стала центральною стратегією для досягнення екологічної стійкості та пом'якшення наслідків зміни клімату. У цьому контексті Україна, як пострадянська держава з історично вуглецевомісткою енергетичною системою, стикається з унікальними викликами та можливостями на шляху до декарбонізації.

Перехід до низьковуглецевої економіки вимагає значних інвестицій. За міжнародними оцінками, Україні знадобиться приблизно 524 мільярди доларів на реконструкцію та відновлення, причому значна частина буде виділена на енергетичну інфраструктуру та проекти зеленого переходу. Ці інвестиції створюють можливості для модернізації, але також створюють фіскальні та фінансові проблеми.

Водночас енергетична криза негативно вплинула на економічні показники. ВВП України залишається приблизно на 20% нижчим за довоєнний рівень, а прогнози зростання на 2026 рік були знижені до ~2,5%, значною мірою через пошкодження енергетичної інфраструктури.

Декарбонізація та пов'язані з війною збої суттєво вплинули на важку промисловість. Наприклад, виробництво сталі скоротилося через дефіцит енергії та тиск, пов'язаний з регулюванням викидів вуглецю, компанії скоротили обсяги діяльності, що потенційно вплинуло на тисячі робочих місць.

Проте, перехід створює нові можливості працевлаштування у відновлюваній енергетиці (сонячній, вітровій, біоенергетиці), секторах енергоефективності, реконструкції та зеленій інфраструктурі.

Результати досліджень айдобрані у працях [3, 4, 5, 6, 7]

3 РОЗДІЛ

ШЛЯХИ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ГЛОБАЛЬНОЇ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

3.1. Оцінка ефективності декарбонізації в умовах циркулярної економіки.

У сучасних умовах глобальної кліматичної трансформації особливого значення набуває проблема оцінювання ефективності декарбонізації, оскільки масштабність переходу до низьковуглецевої економіки потребує не лише формування політичних цілей, а й розроблення комплексних методичних підходів до вимірювання результативності відповідних трансформацій. Традиційні макроекономічні показники дедалі менше відображають реальний рівень екологічної стійкості економіки, що зумовлює необхідність інтеграції кліматичних, ресурсних та інституційних параметрів у систему оцінювання розвитку.

У рамках циркулярної економіки ефективність декарбонізації доцільно розглядати як багатовимірну категорію, що охоплює не лише скорочення викидів парникових газів, а й рівень ресурсоефективності, інноваційності, структурної модернізації та інтеграції низьковуглецевих технологій у виробничі процеси. Такий підхід дозволяє перейти від вузького трактування декарбонізації як екологічного процесу до розуміння її як комплексної моделі трансформації економічної системи.

З метою комплексного оцінювання ефективності декарбонізації в умовах циркулярної економіки доцільно запропонувати авторську інтегровану модель Індекс гібридної мобільності та декарбонізації «Hybrid Mobility and Decarbonization Index» чи HMDI, яка поєднує екологічні, економічні та структурні параметри трансформації.

Модель HMDI може розглядатися як інтегральний інструмент оцінювання ефективності декарбонізації економіки в умовах переходу до циркулярної моделі розвитку. Її доцільність полягає в тому, що традиційні показники декарбонізації, зокрема обсяг викидів CO₂ або частка відновлюваної енергетики, не повністю

відображають комплексність сучасних трансформацій. У межах циркулярної економіки декарбонізація пов'язана не лише зі зменшенням викидів, а й із підвищенням ресурсоефективності, розвитком цифрових сервісів, зміною структури виробництва та посиленням ролі нематеріальних потоків у створенні економічної вартості.

Модель НМДІ поєднує чотири ключові компоненти: розвиток відновлюваної енергетики, рівень циркулярності економіки, цифрово-сервісний компонент В2В та вуглецеву інтенсивність. Її загальний вигляд можна подати так:

$$\text{HMDI} = \alpha \text{RE}_n + \beta \text{CE}_n + \gamma \text{V2V}_n - \delta \text{CI}_n \quad (1)$$

де НМДІ – інтегральний індекс гібридної мобільності та декарбонізації;

RE_n – нормалізований показник розвитку відновлюваної енергетики;

CE_n – нормалізований показник циркулярності економіки;

V2V_n – нормалізований показник цифрових і сервісних потоків;

CI_n – нормалізований показник вуглецевої інтенсивності;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – вагові коефіцієнти впливу відповідних компонентів.

Перший компонент RE_n відображає ступінь енергетичної трансформації економіки через розвиток відновлюваних джерел енергії. Його зростання свідчить про поступове заміщення викопного палива чистими джерелами енергії та зменшення залежності економіки від вуглецемісткої генерації. Для практичного розрахунку можуть використовуватися показники встановленої потужності ВДЕ, частки ВДЕ у виробництві електроенергії або частки ВДЕ у кінцевому споживанні енергії.

CE_n характеризує рівень розвитку циркулярної економіки. Він може включати частку вторинного використання ресурсів, рівень переробки відходів, повторне використання матеріалів або інші показники ресурсоефективності. Його включення до моделі дозволяє врахувати, що скорочення викидів досягається не лише через енергетичний перехід, а й через зменшення матеріаломісткості виробництва та подовження життєвого циклу продукції.

$B2B_n$ відображає цифрово-сервісну трансформацію економіки, зокрема розвиток ІТ-послуг, цифрової торгівлі, B2B-сервісів і віртуальної мобільності. Його включення є важливим елементом авторського підходу, оскільки сучасна глобальна економіка дедалі більше переходить від фізичних потоків товарів і ресурсів до нематеріальних потоків даних, сервісів і цифрових платформ. Це може зменшувати транспортну, енергетичну та матеріальну інтенсивність економічної діяльності.

CI_n - це показник вуглецевої інтенсивності, який відображає обсяг викидів CO_2 на одиницю ВВП. На відміну від інших компонентів, він має негативний знак у моделі, оскільки зростання вуглецевої інтенсивності свідчить про погіршення ефективності декарбонізації. Відповідно, зниження CI_n підвищує значення інтегрального індексу.

Теоретична перевага $NMDI$ полягає в його багатовимірності, де модель дозволяє одночасно оцінити енергетичний, ресурсний, цифровий і кліматичний виміри декарбонізації. Для України така модель є особливо доцільною, оскільки національна траєкторія декарбонізації поєднує розвиток ВДЕ, потребу у циркулярній відбудові, сильний потенціал ІТ-сектору та необхідність зниження вуглецевої інтенсивності економіки.

Порівняльний аналіз індексу гібридної мобільності та декарбонізації свідчить про суттєві відмінності у моделях низьковуглецевої трансформації між Європейським Союзом, азійськими економіками та Україною. Ці відмінності формуються під впливом різного рівня технологічного розвитку, структури енергетичних систем, інституційної спроможності, ступеня інтеграції циркулярної економіки та масштабів цифровізації.

Європейський Союз демонструє найвищі значення $NMDI$ завдяки комплексному поєднанню кліматичної політики, розвинених ринкових механізмів декарбонізації, високого рівня циркулярності економіки та масштабного розвитку зеленого фінансування. Європейська модель характеризується високим рівнем інституційної інтеграції, де декарбонізація виступає не окремим екологічним

напрямом, а складовою загальної стратегії економічної модернізації. Важливу роль відіграють European Green Deal, EU ETS, механізми CBAM та системи ESG-регулювання, які формують довгострокові стимули для низьковуглецевої трансформації виробництва та споживання. Крім того, країни ЄС мають відносно високий рівень circularity rate, що дозволяє поєднувати скорочення викидів із підвищенням ресурсоефективності та зменшенням матеріаломісткості економіки.

Азійська модель декарбонізації є більш неоднорідною та характеризується поєднанням швидкого економічного зростання із масштабною технологічною модернізацією. З одного боку, країни Азії залишаються найбільшим джерелом глобальних викидів CO₂ через значну залежність від вугілля, високий рівень індустріалізації та стрімке зростання урбанізації. З іншого боку, саме Азія стала одним із ключових центрів розвитку сонячної енергетики, виробництва акумуляторів, електромобільності, водневих технологій та цифрової енергетичної інфраструктури. Китай, Японія та Південна активно інвестують у інтелектуальні енергетичні мережі, водневу економіку, системи управління енергією на основі штучного інтелекту та зелену промислову модернізацію. Регіональна модель HMDI залишається нерівномірною, технологічно розвинені економіки Східної Азії демонструють високі значення індексу, тоді як країни Південно-Східної Азії та Індія продовжують залежати від викопного палива та міжнародного кліматичного фінансування.

Україна у цьому порівнянні займає проміжну позицію та перебуває на етапі структурної трансформації моделі розвитку. На відміну від ЄС, українська система декарбонізації ще не має повністю сформованої інституційної архітектури, а механізми carbon pricing, ESG governance та циркулярного регулювання лише формуються. Україна демонструє значний потенціал розвитку HMDI завдяки поєднанню кількох факторів: високої динаміки розвитку цифрового сектору, інтеграції до європейського енергетичного простору, зростання ролі

децентралізованої енергетики та поступового розвитку відновлюваних джерел енергії.

Особливістю української моделі є те, що декарбонізація тісно поєднується з питаннями енергетичної безпеки, післявоєнної реконструкції та модернізації інфраструктури. На відміну від багатьох країн Азії, де головним драйвером декарбонізації виступає промислова конкурентоспроможність, або ЄС, де домінує кліматичне регулювання, в Україні основним стимулом низьковуглецевого переходу дедалі більше стає необхідність енергетичної автономізації та відбудови стійкої економіки.

Порівняльний аналіз також свідчить про суттєві відмінності у структурі компонентів НМДІ. Для ЄС характерними є високі показники циркулярності та інституційної підтримки, для Азії технологічна динаміка та масштабні інвестиції у «чисті технології», тоді як українська модель вирізняється високим потенціалом цифрової мобільності та сервісної економіки. Саме розвиток ІТ-сектору, цифрових В2В-послуг та системи розподіленої енергетики може стати одним із ключових чинників підвищення НМДІ України у довгостроковій перспективі.

Для систематизації зазначених відмінностей доцільно представити порівняльну характеристику моделей декарбонізації у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Порівняльна характеристика моделей декарбонізації

Показник	ЄС	Азія	Україна
Основний драйвер декарбонізації	Кліматичне регулювання	Промислова модернізація	Енергетична безпека та реконструкція
Ціноутворення на вуглець	Високий рівень розвитку	Нерівномірний розвиток	Формується
Коефіцієнт циркулярності	Високий	Нерівномірний	Низький/формується
Розвиток ВДЕ	Високий	Дуже швидке зростання	Трансформаційний етап
Інтелектуальні енергетичні мережі та цифровізація	Високий	Високий у Східній Азії	Помірний, але зростаючий
Зелене фінансування	Розвинене	Швидке розширення	Обмежений доступ

Вуглецева інтенсивність	Низька	Середня	Середня
Потенціал НМДІ	Високий	Високий, але нерівномірний	Високий потенціал зростання

Джерело: складено автором

Порівняльний аналіз НМДІ демонструє, що моделі декарбонізації у різних регіонах світу формуються під впливом різних структурних чинників та інституційних підходів.

Для апробації авторської моделі НМДІ (Hybrid Mobility and Decarbonization Index / Індекс гібридної мобільності та декарбонізації) було здійснено пілотний розрахунок для України за період 2015-2025 рр. Метою такого розрахунку стало комплексне оцінювання динаміки декарбонізаційних процесів в умовах структурної трансформації економіки, розвитку відновлюваної енергетики, цифровізації та поступового впровадження елементів циркулярної економіки. На відміну від традиційних показників екологічної ефективності, запропонований індекс дозволяє інтегрувати кліматичні, ресурсні та цифрово-економічні параметри в єдину систему оцінювання.

Розрахунок НМДІ базувався на чотирьох нормалізованих компонентах: розвитку відновлюваної енергетики (RE_n), рівні циркулярності економіки (CE_n), цифрово-сервісному компоненті ($B2B_n$) та показнику вуглецевої інтенсивності (CI_n). У межах апробації використовувалися нормалізовані значення індикаторів, що дозволило забезпечити їх порівнянність та інтеграцію в єдину модель. Водночас вуглецева інтенсивність мала негативний вплив на підсумкове значення індексу, оскільки зростання обсягів викидів CO_2 на одиницю ВВП свідчить про нижчу ефективність декарбонізації.

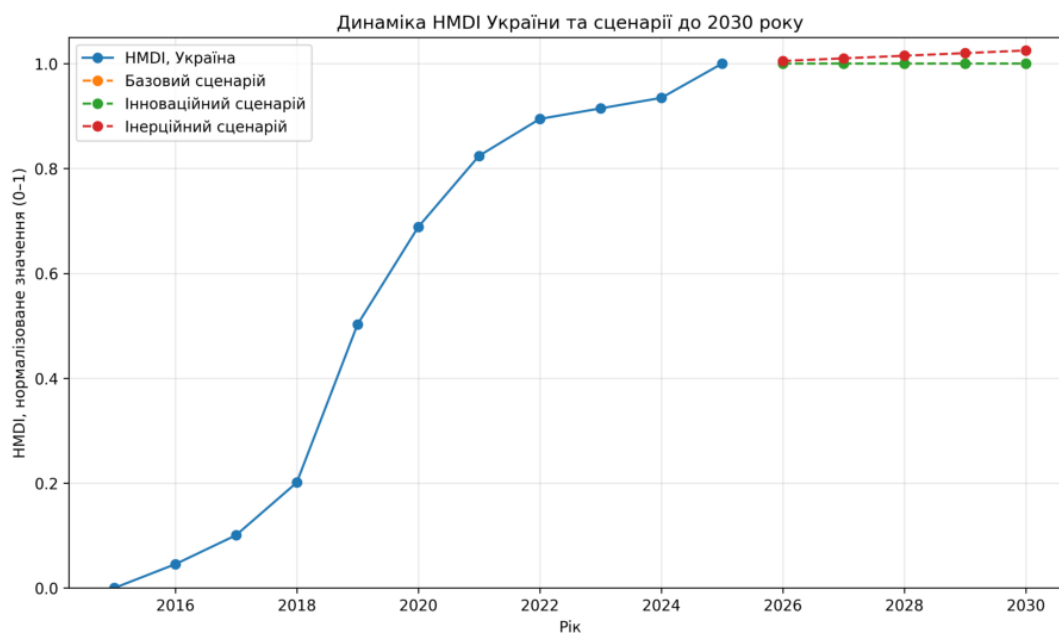


Рис. 3.1. Динаміка індексу гібридної мобільності та декарбонізації (НМДІ) України та сценарії розвитку до 2030 року

Джерело: складено автором

Рисунок 3.1. відображає результати пілотного розрахунку авторського індексу НМДІ (Hybrid Mobility and Decarbonization Index / Індекс гібридної мобільності та декарбонізації) для України у 2015-2025 рр., а також прогнозні сценарії його розвитку до 2030 року. Динаміка індексу демонструє поступове посилення процесів декарбонізації, розвитку відновлюваної енергетики, цифровізації економіки та інтеграції елементів циркулярної моделі розвитку.

Отримані результати демонструють виражену позитивну динаміку НМДІ в Україні упродовж досліджуваного періоду. У 2015-2018 рр. значення індексу залишалося відносно низьким, що пояснюється незначною часткою відновлюваної енергетики, високою енергоємністю економіки та обмеженим рівнем інтеграції принципів циркулярної економіки. Водночас уже з 2019 року спостерігається різке прискорення зростання НМДІ, насамперед унаслідок активного розвитку сонячної та вітрової енергетики, збільшення цифрового сектору економіки та поступового зниження вуглецевої інтенсивності.

Особливо важливим чинником зростання індексу став розвиток цифрових та сервісних B2B-потоків, зокрема IT-послуг, дистанційної зайнятості та цифрової економіки. Україна поступово інтегрується у глобальні цифрові ринки, а сектор IT-послуг перетворюється на один із ключових драйверів структурної модернізації економіки. У межах моделі це відображається через зростання компонента B2B_n, який компенсує частину вуглецевого навантаження традиційних секторів економіки.

Суттєвий вплив на динаміку індексу мав також розвиток відновлюваної енергетики. Упродовж 2018–2021 рр. в Україні відбулося різке збільшення встановлених потужностей сонячної та вітрової енергетики, що стало одним із ключових факторів підвищення значення НМДІ. Навіть попри воєнні виклики та руйнування енергетичної інфраструктури у 2022–2024 рр., тенденція до розвитку децентралізованої енергетики, локальних систем генерації та енергетичної автономізації збереглася, що підтримало позитивну траєкторію індексу.

Упродовж 2020-2021 рр. спостерігається найбільш інтенсивне зростання НМДІ, що пов'язано з активним розвитком сонячної та вітрової енергетики, розширенням цифрового сектору та поступовим зниженням вуглецевої інтенсивності економіки. У 2022-2025 рр. динаміка індексу зберігає позитивну траєкторію попри воєнні виклики та структурні втрати енергетичної інфраструктури, що свідчить про адаптивність процесів енергетичної трансформації та посилення ролі децентралізованих енергетичних систем. Таблицю із вихідними даними подано у Додатку Є

Результати розрахунку свідчать про нерівномірність декарбонізаційної трансформації. Найбільш слабким компонентом моделі залишається рівень циркулярності економіки (CE_n), оскільки в Україні все ще недостатньо розвинені системи переробки відходів, вторинного використання ресурсів та індустріальної симбіозності. Це свідчить про те, що декарбонізація в Україні наразі значною мірою

орієнтована на енергетичний перехід, тоді як циркулярний компонент перебуває на етапі формування.

Побудована динаміка НМДІ дозволила також сформулювати сценарії розвитку до 2030 року. Базовий сценарій передбачає поступове зростання індексу за рахунок продовження розвитку ВДЕ, цифрової економіки та інтеграції до європейського кліматичного простору.

Інноваційний сценарій передбачає прискорену структурну трансформацію економіки України на основі масштабного впровадження низьковуглецевих технологій, цифровізації енергетичних систем та інтеграції принципів циркулярної економіки у післявоєнну реконструкцію. У межах цього сценарію декарбонізація розглядається не лише як екологічне зобов'язання, а як стратегічний драйвер модернізації національної економіки та інтеграції України до європейського кліматичного простору.

Ключовими чинниками зростання НМДІ у цьому сценарії виступають активний розвиток відновлюваної енергетики, масштабне впровадження інтелектуальних енергетичних мереж, розвиток систем накопичення енергії, водневих технологій та цифрових сервісних платформ. Передбачається суттєве збільшення інвестицій у сонячну та вітрову енергетику, децентралізовані системи генерації та локальні енергетичні спільноти. Цифровізація енергетичного сектору забезпечує оптимізацію енергоспоживання, підвищення енергоефективності та зменшення втрат у мережах.

Особливу роль у межах інноваційного сценарію відіграє розвиток зеленого фінансування, включаючи зелені облігації, міжнародні кліматичні фонди, механізми ESG-фінансування та європейські інвестиційні програми. Це дозволяє прискорити модернізацію промисловості, розвиток циркулярних виробничих моделей та впровадження ресурсоефективних технологій. Передбачається також активне залучення України до механізмів СВМ, European Green Deal та європейських програм енергетичної інтеграції.

У межах цього сценарію зростає роль цифрової економіки та B2B-сектору, що сприяє переходу від матеріаломісткої моделі розвитку до економіки сервісів, даних та високотехнологічних рішень. Паралельно реалізуються програми циркулярної реконструкції інфраструктури, розвитку вторинного використання ресурсів та екологічної модернізації міст. У результаті НМДІ демонструє прискорену позитивну динаміку, що свідчить про формування більш стійкої, інноваційної та низьковуглецевої моделі економіки.

Інерційний сценарій ґрунтується на уповільненні темпів структурної модернізації та збереженні високої залежності економіки від традиційних вуглецемістких секторів. У межах цього сценарію процеси декарбонізації відбуваються фрагментарно та нерівномірно, а розвиток низьковуглецевих технологій стримується фінансовими, інституційними та технологічними обмеженнями.

Основними характеристиками інерційного сценарію є недостатній рівень інвестицій у відновлювану енергетику, повільне оновлення енергетичної інфраструктури та обмежене впровадження інтелектуальних енергетичних систем. Значна частина енергетичного сектору продовжує орієнтуватися на централізовану модель генерації та використання викопного палива, що зберігає високий рівень вуглецевої інтенсивності економіки.

У межах інерційного сценарію також спостерігається повільний розвиток циркулярної економіки. Недостатній рівень переробки відходів, низька частка вторинного використання ресурсів та обмежена екологічна модернізація промисловості стримують зростання показника циркулярності. Паралельно зберігається слабка інтеграція ESG-підходів та механізмів зеленого фінансування у корпоративний сектор.

Суттєвим обмеженням стає також недостатня інтеграція України до глобальних та європейських кліматичних механізмів, що ускладнює доступ до міжнародного кліматичного фінансування та сучасних технологій. У результаті

цифровізація енергетики та промисловості відбувається повільніше, а потенціал ІТ-сектору та цифрових B2B-моделей не повною мірою трансформується у фактор низьковуглецевого розвитку.

За такого сценарію НМДІ зберігає позитивну, але значно повільнішу динаміку. Це свідчить про часткове продовження декарбонізаційних процесів, однак без формування комплексної моделі низьковуглецевої циркулярної економіки. У довгостроковій перспективі інерційний сценарій може призвести до поглиблення технологічного відставання, посилення конкурентного тиску з боку європейських кліматичних механізмів та зростання ризиків для економічної стійкості України.

Порівняльний аналіз свідчить, що Україна поступово наближається до європейської моделі низьковуглецевого розвитку, однак все ще суттєво поступається країнам ЄС за рівнем інтеграції циркулярної економіки та інституційної підтримки декарбонізації. Водночас українська модель має власну специфіку, оскільки процеси декарбонізації тісно пов'язані з питаннями енергетичної безпеки, післявоєнної реконструкції та цифрової трансформації економіки.

Апробація НМДІ для України підтверджує можливість використання інтегрованих індексних моделей для оцінювання ефективності декарбонізації в умовах циркулярної економіки. Запропонований підхід дозволяє комплексно аналізувати взаємозв'язок між енергетичним переходом, цифровізацією, ресурсоефективністю та структурною модернізацією економіки, що формує підґрунтя для подальших наукових досліджень та розроблення стратегій низьковуглецевого розвитку.

3.2. Регіональні особливості впровадження декарбонізації в Україні

Впровадження декарбонізації в Україні – це складний та багатовимірний процес, на який глибоко впливають регіональна неоднорідність, історичні моделі промислового розвитку, територіальні диспропорції в економічній структурі та постійні геополітичні виклики, включаючи масштабне руйнування інфраструктури, спричинене війною.

Реалізація політики декарбонізації в Україні неоднорідна та значною мірою залежить від регіональних відмінностей в економічній структурі, доступності ресурсів, розвитку інфраструктури та адміністративному потенціалі.

Процес декарбонізації в Україні не можна розуміти як однорідну національну трансформацію, оскільки регіональні економічні структури суттєво визначають як інтенсивність викидів, так і доцільність стратегій пом'якшення наслідків. Промислові регіони східної та південно-східної України характеризуються високим рівнем викидів парникових газів через концентровану металургію, виробництво енергії на основі вугілля та важку обробку промисловість. На противагу цьому, центральні регіони демонструють змішану структуру, де сільське господарство, транспорт та помірна промислова діяльність сприяють викидам, тоді як західні регіони загалом демонструють нижчу вуглецеву інтенсивність та більший потенціал для розвитку відновлюваної енергетики, зокрема в біомасі, сонячній енергії та малих гідроенергетичних системах.

Окрім структурних економічних відмінностей, війна значно змінила енергетичний ландшафт України та прискорив певні аспекти декарбонізації. Руйнування централізованої енергетичної інфраструктури підвищило важливість децентралізованих та стійких енергетичних систем, включаючи маломасштабні сонячні установки, виробництво енергії з біомаси та локальні рішення для зберігання енергії. Ці зміни посилили роль регіональних органів влади та місцевих громад у забезпеченні енергетичної безпеки та впровадженні кліматично чистих технологій.

Крім того, процес європейської інтеграції України слугує ключовим рушієм політики декарбонізації. Узгодження з Європейською зеленою угодою, прийняття екологічних норм ЄС та участь у міжнародних кліматичних програмах створюють потужні інституційні стимули для скорочення викидів та модернізації регіональних економік. Однак темпи та ефективність впровадження значно відрізняються залежно від регіону через відмінності у фінансових можливостях, інституційній силі, інвестиційній привабливості та доступі до сучасних технологій.

Незважаючи на значний прогрес у розробці політики, Україна все ще стикається зі суттєвими викликами у досягненні збалансованої регіональної декарбонізації. До них належать збереження застарілої промислової інфраструктури, обмежений доступ до зеленого фінансування, нерівномірна технологічна модернізація та соціальні ризики, пов'язані з переходом від вуглецевомістких галузей промисловості. Вирішення цих викликів вимагає комплексного підходу, який інтегрує національні стратегії з регіонально-специфічною політикою розвитку, гарантуючи, що жоден регіон не залишиться позаду у переході до низьковуглецевої економіки.

Регіональний вимір декарбонізації є критично важливою аналітичною основою для розуміння того, як кліматична політика нерівномірно впроваджується на територіях з різними економічними структурами, ресурсними запасами та інституційними можливостями. Регіональні відмінності суттєво впливають як на темпи, так і на ефективність низьковуглецевої трансформації.

В економічній географії регіони вважаються ключовими одиницями кліматичного переходу, оскільки вони зосереджують певні промислові сектори, ринки праці, інфраструктурні системи та моделі споживання енергії. Тому результати декарбонізації за своєю суттю просторово диференційовані.

В Україні регіональна декарбонізація формується трьома домінуючими територіальними моделями:

- ⇒ промислові регіони, що характеризуються високою інтенсивністю викидів, застарілими вугільними енергетичними системами та залежністю від металургії та важкої промисловості;
- ⇒ аграрно-центральні регіони, де викиди походять переважно від землекористування, тваринництва та транспорту, а не від важкої промисловості;
- ⇒ регіони, орієнтовані на послуги та транскордонні регіони, які демонструють більшу гнучкість у впровадженні технологій відновлюваної енергетики та екологічних стандартів, узгоджених з ЄС.

Таблиця 3.2.

**Регіональна структура викидів та енергетичних профілів в Україні
(орієнтовні показники, 2023 р.)**

Тип регіону	Частка населення країни (%)	Частка викидів CO ₂ (%)	Домінуючі джерела викидів	Частка відновлюваної енергії (%)	Рівень енергоємності
Промислові регіони	35%	55–60%	Металургія, вугільна енергетика, важка промисловість	10–15%	Дуже високий
Агроцентральні регіони	40%	25–30%	Сільське господарство, транспорт, землекористування	15–20%	Середній
Сервісні / транскордонні регіони	25%	10–15%	Служба, будівлі, транспорт	25–35%	Низький–Середній

Джерело: складено автором за [6,7,8]

Регіональна структура викидів в Україні демонструє значну концентрацію викидів у промислових регіонах, що пов'язано з високою часткою важкої промисловості та енергетики на викопному паливі. Агроцентральні регіони формують середній рівень викидів, де ключову роль прогресують сільське господарство та транспортна інфраструктура. Сервісні та транскордонні регіони характеризуються нижчим рівнем викидів і вищою частиною відновлюваної енергетики, що показує поступовий перехід до менш енергоємної економічної структури. Загалом все просторово нерівномірна декарбонізація, що потребує диференційованої регіональної політики.

Згідно з теорією регіонального переходу, «територіальна неоднорідність визначає диференційовані шляхи низьковуглецевого розвитку, що вимагає місцевих політичних втручань, а не єдиних національних стратегій» [2, с. 78–92].

Крім того, регіональна декарбонізація тісно пов'язана з концепцією багаторівневого управління, де кліматична політика реалізується через взаємодію між національними урядами, регіональними органами влади, муніципалітетами та міжнародними інституціями. У випадку України ця структура управління набуває дедалі більшого значення завдяки реформам децентралізації та зростаючій ролі місцевого самоврядування в енергетичному плануванні.

Таблиця 3.3

Багаторівнева структура управління впровадженням кліматичної політики в Україні

Рівень управління	Ключові обов'язки	Інструменти кліматичної політики	Потенціал впровадження	Частка впливу (%)
Національний уряд	Стратегія, законодавство, цілі	Національна енергетична стратегія, узгодження з ETS	Високий	45%
Регіональні органи влади	Планування інфраструктури, регіональні програми	Регіональні енергетичні плани, субсидії	Середній	25%
Муніципалітети	Міське впровадження, ефективність будівель	Міська мобільність, модернізація опалення	Середній–Низький	20%
Міжнародні інституції	Фінансування, технічна допомога	Гранти, позики, програми інтеграції з ЄС	Високий (фінансовий)	10–15%

Джерело: складено автором за [9,10,11]

Система управління кліматичною політикою в Україні має багаторівневий характер із домінуванням національного рівня, який визначає стратегічні цілі та нормативно-правову базу декарбонізації. Регіональний рівень змінює важливу роль в адаптації політики до територіальних особливостей, тоді як муніципалітети забезпечують практичну реалізацію заходів у сфері енергоефективності та міської

інфраструктури. Міжнародні інституції формують значну фінансову та технічну підтримку, підсилюючи можливості впровадження кліматичних ініціатив. Загалом ефективність політики залежить від координації між рівнями управління та узгодженості інституційних механізмів.

Ще одним важливим теоретичним аспектом є поява регіональних інноваційних систем, які підкреслюють роль локалізованих технологічних кластерів, університетів та промислових мереж у сприянні зеленій трансформації. Регіони з сильнішим інноваційним потенціалом, як правило, швидше та ефективніше впроваджують рішення у сфері відновлюваної енергії.

Таблиця 3.4

Показники регіонального інноваційного потенціалу та ефективності декарбонізації

Тип регіону	Інтенсивність досліджень та розробок (% від ВВП)	Рівень впровадження проєктів відновлюваної енергетики	Підвищення енергоефективності (%)	Рівень інноваційної інфраструктури
Промислові регіони	0,5–1,0%	Середній	10–15%	Середній
Агроцентральні регіони	0,3–0,7%	Низький–Середній	5–10%	Низький
Сервісні/транскордонні регіони	1,0–2,0%	Високий	15–25%	Високий

Джерело: складено автором за [9,10,11]

Регіональний інноваційний потенціал є ключовим фактором ефективності процесів декарбонізації. Сервісні та транскордонні регіони демонструють найвищі показники інноваційної активності та впровадження відновлених технологій, що пов'язані з концентрацією наукових установ, міжнародного співробітництва та доступу до інвестицій. Промислові регіони характеризуються середнім рівнем інноваційності, але мають значний потенціал для підвищення енергоефективності за рахунок модернізації виробничих процесів. Агроцентральні регіони відстають за всіма ключовими показниками, що обмежують темпи їхньої екологічної трансформації та потребують посилення державної підтримки інновацій.

Принцип справедливого переходу став центральною нормативною основою глобальної кліматичної політики, що гарантує, що перехід до низьковуглецевої

економіки не завдасть непропорційної шкоди працівникам, громадам чи регіонам, залежним від вуглецевомістких галузей промисловості. Він наголошує на соціальній справедливості, інклюзивності та підтримці економічної реструктуризації під час перехідного процесу.

Ця концепція виникла в рамках трудових та екологічних рухів і була інституціоналізована такими організаціями, як Міжнародна організація праці, яка визначає справедливий перехід як процес, що «забезпечує екологічну стійкість, одночасно сприяючи гідній праці та соціальній інтеграції» [3, с. 15–27].

У контексті декарбонізації справедливий перехід включає кілька ключових вимірів як трансформація ринку праці, включаючи перепідготовку та перекваліфікацію працівників вугільної та важкої промисловості, регіональна економічна диверсифікація, спрямована на зменшення залежності від моногалузевих економік, механізми соціального захисту, що забезпечують стабільність доходів під час структурних економічних зрушень, участь громад, що дозволяє місцевому населенню брати участь у процесах прийняття рішень щодо енергетичної та промислової трансформації.

Таблиця 3.5

Соціальний та трудовий вплив енергетичного переходу (глобальне та регіональне порівняння, 2023–2024 рр.)

Показник	Європа	Україна	Азія (середнє значення)
Зайнятість у секторах викопного палива (млн осіб)	1,2	0,4	10–12
Очікувані втрати робочих місць до 2030 року (%)	5–8%	10–12%	8–15%
Охоплення програмами перекваліфікації	Високе (70–80%)	Середнє (40–50%)	Низьке–Середнє (30–50%)
Індекс сили соціального захисту	Високе	Середнє	Низьке–Середнє
Фінансування справедливого переходу на душу населення (дол. США/рік)	120–250	20–50	30–100

Джерело: складено автором за [12,13,14, 15]

Соціально-трудова дослідження енергетичного переходу суттєво відрізняються між регіонами, відображаючи рівень економічного розвитку та інституційної готовності до структурних змін. Європа демонструє найбільш

розвинену систему соціального захисту та перекваліфікації працівників, що знижує соціальні ризики трансформації енергетичного сектору. Україна переходить у фазу формування відповідних механізмів, з вищими ризиками втрати робочих місць та обмеженим фінансуванням справедливого переходу. В Азії масштаб зайнятості у вичерпаному паливі значно більший, що створюють системні соціальні виклики, однак рівень соціального захисту та перекваліфікації залишається нерівномірним між країнами регіону.

В Україні принцип справедливого переходу є особливо актуальним для вугільно-залежних регіонів, таких як Донецька та Луганська (які зараз постраждали від війни), а також для частин Дніпропетровської та Львівської областей, де гірничодобувна діяльність історично відіграла значну економічну роль.

Таблиця 3.6

**Регіональна вразливість до викликів справедливого переходу в Україні
(орієнтовні показники)**

Тип регіону	Зайнятість у вугільному/гірничодобувному секторі (%)	Економічна залежність від вичерпаної промисловості (%)	Ризик втрати робочих місць (%)	Рівень диверсифікації
Східні промислові регіони	20–30%	40–50%	Дуже високий (30–40%)	Низький
Центральні промислові регіони	10–15%	25–35%	Високий (20–30%)	Середній
Західні регіони (наприклад, Львівська область)	3–7%	10–15%	Середній (10–15%)	Середній–Високий

Джерело: складено автором за [12,13,14, 15]

Регіональна структура вразливості до справедливого енергетичного переходу в Україні є суттєво неоднорідною. Східні промислові регіони характеризуються найвищим рівнем залежності від вичерпаної промисловості та, відповідно, максимальними соціально-економічними ризиками трансформації. Центральні регіони мають середній рівень диверсифікації, що частково пом'якшує негативні

наслідки, однак ризики втрати робочих місць залишаються високими. Західні регіони демонструють досить низьку залежність від вугільно-промислового сектору та вищий рівень економічної диверсифікації, що робить їх більш стійкими до структурних змін.

Як наголошується в академічних дослідженнях, «без цілеспрямованих механізмів соціальної та економічної підтримки декарбонізація ризикує поглибити регіональну нерівність та створити нові форми соціально-економічної ізоляції» [4, с. 101–118].

Крім того, справедливий перехід все більше пов'язується із зеленою промисловою політикою, яка сприяє інвестиціям у галузі відновлюваної енергетики, енергоефективні технології та сталу інфраструктуру в регіонах, що переживають економічну реструктуризацію. Такий підхід гарантує, що декарбонізація стане не лише екологічною необхідністю, але й рушійною силою регіональної економічної модернізації.

Таблиця 3.7

Потреби в інвестиціях для справедливого переходу оцінки на 2024 рік

Сектор/Область	Оцінка необхідних інвестицій (дол. США)	Поточний рівень фінансування	Дефіцит фінансування
Програми перепідготовки працівників	50–80 млрд доларів США у світі	40% покриття	Високий
Регіональні фонди диверсифікації	200–300 млрд доларів США	30–35% покриття	Дуже високий
Системи соціального захисту	150–250 млрд доларів США	50% покриття	Середній
Зелений промисловий розвиток	500+ млрд доларів США	60% покриття	Високий

Джерело: складено автором за [10,13,14]

Оцінки інвестиційних потреб свідчать про значний глобальний дефіцит фінансування справедливого енергетичного переходу, особливо в частині регіональної диверсифікації економік. Найбільший розрив у формуванні регіональних фондів трансформації, що вказує на недостатню підтримку території, найбільш залежних від викопних видів палива. Програми перепідготовки

працівників та системи соціального захисту мають досить вищий рівень забезпечення, однак також залишаються недофінансованими. Зелений промисловий розвиток потребує найбільших абсолютних інвестицій, що підкреслює капіталомісткий характер структурної трансформації економіки.

Регіональна структура викидів парникових газів та енергетичних систем в Україні характеризується значною територіальною диференціацією, яка відображає історичні закономірності індустріалізації, розподілу ресурсів та економічної спеціалізації. Енергетичний ландшафт України формувався десятиліттями промислового планування радянської епохи, де важка промисловість була зосереджена в певних східних та південно-східних регіонах, тоді як центральні та західні райони залишалися більш диверсифікованими або орієнтованими на сільське господарство. Як наслідок, сучасні проблеми декарбонізації є дуже нерівномірними по всій території країни.

З теоретичної точки зору, регіональні структури викидів можна інтерпретувати крізь призму просторової екологічної нерівності, що пояснює, чому екологічні навантаження непропорційно зосереджені в економічно спеціалізованих промислових регіонах. В Україні ця нерівномірність ще більше посилюється деградацією інфраструктури, неефективністю використання енергії та постійними наслідками війни.

Східний промисловий макрорегіон України, що включає Дніпропетровську, Донецьку, Запорізьку та Харківську області, історично слугував ядром важкої промислової та енергоємної виробничої системи країни. Цей регіон характеризується високою концентрацією металургії, вугільної промисловості, хімічної промисловості та великих потужностей з виробництва електроенергії.

Ці сектори є одними з найбільш вуглецеємних у національній економіці, непропорційно вносячи свій внесок у загальний обсяг викидів парникових газів. Згідно з регіональними енергетичними дослідженнями, промисловий схід України становить значну частку викидів CO₂ через застарілі технології виробництва,

низьку енергоефективність та залежність від джерел енергії на основі викопного палива [1, с. 34–52].

Таблиця 3.8

Промисловий та екологічний профіль Східної України 2021–2023 рр..

Показник	Дніпропетровська	Донецька	Запорізька	Харківська	Середнє значення Східного макрорегіону
Частка національного промислового виробництва (%)	18%	12%	10%	~9%	49%
Частка викидів CO ₂ (%)	20–22%	18–20%	12–14%	10–12%	60–65%
Залежність від вугілля в енергетичному балансі (%)	35%	55%	40%	30%	40–45%
Частка важкої промисловості (металургія, хімічна промисловість)	Висока (60%)	Дуже висока (70%)	Висока (55%)	Середня (40%)	Висока
Середня енергоефективність промисловості (порівняно з еталоном ЄС)	55%	45%	50%	60%	52%

Джерело: складено автором за [13,14]

Східний макрорегіон України характеризується високою концентрацією важкої промисловості та значною часткою в національних промислових викидах CO₂, що формує його як один із ключових емітентів парникових газів у країні. Найбільшою вуглецемісткою є Донецька область, що пов'язано з домінуванням металургії та високою залежністю від вугільної генерації. Дніпропетровська та Запорізька області також демонструють значний промисловий та енергетичний тиск на довкілля, тоді як Харківська область має дещо нижчі показники за рахунок більш диверсифікованої економічної структури. Загалом рівень енергоефективності регіону залишається нижчим за і європейські еталони, що вказує на високий потенціал модернізації та декарбонізації промислового сектора.

Ключовою структурною проблемою регіону є збереження вуглецевої залежності, ситуації, коли існуюча промислова інфраструктура та економічна залежність перешкоджають швидкому переходу до низьковуглецевих альтернатив. Металургійні заводи та вугільні шахти потребують значних капіталовкладень для модернізації, що робить декарбонізацію економічно та політично складною.

Таблиця 3.9

Індикатори структурної залежності промислової системи Східної України

Індикатор	Очікуване значення	Інтерпретація
Частка застарілих промислових активів радянської епохи	65–75%	Високий технологічний знос
Необхідні інвестиції в модернізацію (сталеплавильний сектор)	\$ 15–25 млрд	Дуже висока капіталомісткість
Енергоємність ВВП (порівняно з середнім показником по ЄС)	2,5–3,0× вища	Низька ефективність
Частка викопного палива в промисловому енергоспоживанні	70–80%	Сильна вуглецева блокування
Частка галузей промисловості, що потребують глибокої декарбонізації	80–90%	Структурні проблеми

Джерело: складено автором за [11,12,14]

Промислова система Східної України характеризується високим рівнем структурної інерційності, що зумовлено домінуванням застарілих виробничих фондів та значною залежністю від викопного палива. Висока енергоємність економіки в порівнянні з європейськими стандартами виробництва про низьку ефективність технологічних процесів та обмеження конкурентоспроможності. Значна частка галузей, що потребують глибокої декарбонізації, вказує на масштабність майбутніх трансформаційних викликів. У сукупності цих факторів формується високий рівень «вуглецевого блокування», що ускладнює швидкий перехід до розвитку низьковуглецевої моделі.

Крім того, енергетична система на сході України є сильно централізованою, спираючись на великі теплові електростанції та взаємопов'язані мережі передачі. Це підвищує вразливість не лише до вуглецевої неефективності, але й до фізичних руйнувань, особливо в контексті повномасштабного вторгнення.

Таблиця 3.10

Характеристики енергетичної системи східної України

Індикатор	Значення	Наслідок
Частка виробництва електроенергії з вугілля	45–55%	Висока викидоємність
Частка централізованих електростанцій	80–85%	Низька гнучкість системи
Індекс стійкості мережі	Середній–низький	Вразливість до збоїв
Проникнення відновлюваної енергії	5–10%	Недорозвинений потенціал
Залежність від встановленої теплової потужності	70%	Сильна прив'язка до викопного палива

Джерело: складено автором за [9,10]

Енергетична система Східної України характеризується високою залежністю від вугільної та теплової генерації, що формує значний рівень викидів та обмежує можливості швидкої декарбонізації. Домінування централізованих електростанцій знижує гнучкість системи та її здатність адаптуватися до змін попиту та інтеграції відновлених джерел енергії. Низький рівень проникнення ВДЕ проти недостатнього розвитку інвестицій у чисту енергетику. Сукупно це формує енергетичну модель із високою інерційністю та підвищеною вразливістю до технологічних і екологічних трансформацій.

Як зазначається в академічній літературі, «промислові східні регіони є як зонами з найвищою концентрацією викидів, так і найбільш структурно стійкими районами до швидкої декарбонізації через вкорінені промислові залежності» [2, с. 63–79].

Попри ці виклики, регіон також має значний потенціал для трансформації шляхом електрифікації промисловості, пілотних проектів водневої металургії та модернізації виробництва сталі з використанням технологій електродугових печей.

Таблиця 3.11

Потенціал декарбонізації східної України (сценарії переходу до 2035 року)

Шлях переходу	Оцінений потенціал скорочення викидів CO ₂ (%)	Потреба в інвестиціях	Доцільність
Електрифікація промисловості	20–30%	Високий	Середній
Металургія на основі водню	30–45%	Дуже високий	Низький–Середній
Підвищення енергоефективності	10–15%	Середній	Високий
Інтеграція відновлюваних джерел енергії	15–25%	Середній	Середній–Високий
Повна модернізація системи	50–60%	Надзвичайно високий	Довгостроковий

Джерело: складено автором за [13,14]

Сценарії декарбонізації Східної України демонструють, що найбільш збалансованими за обсягом витрат і ефективності є заходи з підвищення енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Електрифікація промисловості має значний потенціал скорочення викидів, проте потребує суттєвих інвестицій у модернізацію інфраструктури. Воднева металургія забезпечує один із найвищих рівнів результату скорочення викидів, але її впровадження обмежене високою вартістю та технологічною складністю. Повна системна модернізація дозволяє досягти максимального ефекту декарбонізації, проте є капіталомісткою та потребує довгострокового стратегічного планування. Загалом ефективний перехід вимагає комбінування кількох сценаріїв.

Центральні регіони України, включаючи Полтавську, Черкаську, Вінницьку, Кіровоградську та Київську області (за винятком столиці), характеризуються більш збалансованою економічною структурою з потужною сільськогосподарською базою та помірним промисловим розвитком. Викиди в цих регіонах пов'язані переважно із сільським господарством, транспортом, дрібномасштабним виробництвом та споживанням енергії в житловому секторі.

Сільськогосподарські викиди переважно складаються з метану (CH₄) та закису азоту (N₂O), що утворюються в результаті виробництва тваринництва,

методів управління ґрунтами та використання добрив. На відміну від промислових викидів CO₂, ці гази тісніше пов'язані з біологічними процесами та системами землекористування.

Таблиця 3.12

**Структура викидів центральних сільськогосподарських регіонів
України 2023 року**

Джерело викидів	Частка від загальних регіональних викидів (%)	Основні гази	Ключові рушійні сили
Сільське господарство	45–55%	CH ₄ , N ₂ O	Худоба, добрива, використання ґрунту
Транспорт	20–25%	CO ₂	Автомобільний транспорт, використання палива
Житловий сектор	15–20%	CO ₂	Опалення, споживання енергії
Дрібна промисловість	10–15%	CO ₂	Харчова промисловість, легка промисловість

Джерело: складено автором за [15,16]

Викиди у центральних аграрних регіонах України мають чітко виражену сільськогосподарську домінанту, що відрізняє їх від індустріальних регіонів. Основну роль грають не енергетичні, а біогенні викиди метану та закису азоту, що ускладнює їх скорочення через технологічні обмеження. Транспорт і житловий сектор формують додатковий вуглецевий тиск, пов'язаний із використанням викопного палива. Загалом структура викидів про необхідність впровадження клімату підвищення розумного сільського господарства, енергоефективності та розвитку низьковуглецевого транспорту.

З точки зору регіональної енергетики, центральна Україна демонструє відносно вищий потенціал для розвитку біоенергетики, включаючи виробництво біогазу з сільськогосподарських відходів, системи опалення на біомасі та дрібномасштабні проекти відновлюваної енергетики. Ці ресурси забезпечують важливий шлях для децентралізованої декарбонізації.

Таблиця 3.13

Потенціал відновлюваної енергії та біоенергетики в центральній Україні

Індикатор	Орієнтовне значення	Інтерпретація
Потенціал сільськогосподарських відходів (млн тонн/рік)	35–45	Висока доступність біомаси
Потенціал виробництва біогазу (млрд м ³ /рік)	7–10	Значний потенціал заміщення
Частка домогосподарств, придатних для опалення біомасою	30–40%	Високий потенціал децентралізації
Частка встановлених потужностей відновлюваної енергії	15–20%	Зростає, але помірно
Рівень сонячної радіації (кВт·год/м ² /рік)	1200–1400	Сприятливий для сонячної енергії

Джерело: складено автором за [15,16]

Центральні регіони України мають значний потенціал розвитку біоенергетики, що обумовлено високою доступністю сільськогосподарських відходів та можливістю масштабного виробництва біогазу. Це створює передумови для заміни викопного палива та підвищення енергетичної незалежності. Висока частка домогосподарств, придатних для використання біомаси, сприяння розвитку децентралізованих енергетичних систем. Водночас потенціал сонячної енергетики також є сприятливим, хоча рівень її впровадження залишився обмеженим. Загалом регіон має перспективи для формування диверсифікованої низьковуглецевої енергетичної моделі.

Крім того, центральні регіони все частіше впроваджують заходи енергоефективності в житлових та громадських будівлях, включаючи термомодернізацію, модернізацію централізованого теплопостачання та інтелектуальні системи обліку. Ці заходи підтримуються національними програмами енергоефективності та міжнародними фінансовими установами.

Таблиця 3.14

Показники енергоефективності в центральних регіонах

Показник	Значення	Тенденція
Частка будівель, що потребують термомодернізації	60–70%	Висока потреба
Середня економіка енергії після реконструкції	25–40%	Значна
Впровадження інтелектуальних лічильників	30–45%	Зростає
Охоплення модернізації централізованого теплопостачання	20–30%	Поступово
Потенціал скорочення споживання енергії домогосподарствами	30%	Високий

Джерело: складено автором за [13,14]

Центральні регіони України характеризуються значним нереалізованим потенціалом підвищення енергоефективності, особливо у житловому секторі. Висока частина будівель, що потребують термомодернізації, говорять про системні проблеми енергоспоживання, сформовані ще в попередні періоди. Водночас модернізація будівель дозволяє досягти суттєвої економії енергії, що робить цей напрям одним із найбільш ефективних з точки зору витрат і результату. Поступове впровадження інтелектуальних систем обліку та оновлення теплопостачання створює передумови для підвищення керованості енергоспоживання. Загалом сектор домогосподарств залишається ключовою сферою для реалізації політики енергоефективності.

Згідно з регіональними екологічними оцінками, «центральні сільськогосподарські регіони є перехідними зонами, де декарбонізація зумовлена не промисловою реструктуризацією, а модернізацією сільського господарства та розподіленим впровадженням відновлюваної енергії» [3, с. 91–104].

Однак проблеми залишаються, зокрема обмежені інвестиційні можливості, фрагментовані структури власності на землю та недостатнє впровадження технологій у сільськогосподарські виробничі системи.

Таблиця 3.15

Ключові виклики декарбонізації в центральних сільськогосподарських регіонах

Виклик	Очікуваний масштаб	Вплив на декарбонізацію
Обмежений доступ до зеленого фінансування	50–60% ферм	Уповільнює впровадження технологій
Фрагментована власність на землю	70% малих/середніх ферм	Знижує ефективність
Низький рівень впровадження точного землеробства	20–30%	Обмежує скорочення викидів
Прогалини в інфраструктурі (енергетика, логістика)	Середній–Високий	Обмежує впровадження відновлюваних джерел енергії
Залежність від традиційних практик	Високий	Уповільнює перехід

Джерело: складено автором за [17,18]

Декарбонізація аграрних регіонів України завершується комплексом структурних та інституційних бар'єрів. Найсуттєвішим є обмежений доступ до фінансування, що ускладнює впровадження інноваційних технологій, особливо для малих і середніх господарств. Фрагментована структура землеволодіння знижує ефективність масштабних інвестицій і ускладнює кооперацію. Водночас недостатній рівень впровадження точного виробництва та традицій збереження земельних практик обмежує можливості скорочення викидів у сільському господарстві. Інфраструктурні обмеження додатково сприяють розвитку відновлюваної енергетики. У сукупності це вимагає комплексної політики, спрямованої на фінансову підтримку, інституційні реформи та технологічну модернізацію агросектора.

Західні та північні регіони України, включаючи Львівську, Тернопільську, Івано-Франківську, Волинську, Закарпатську, Рівненську та Чернігівську області, демонструють порівняно нижчі рівні промислових викидів та вищий потенціал для розвитку відновлюваної енергетики. Ці регіони менш промислово розвинені та більше орієнтовані на сільське господарство, лісове господарство, послуги та транскордонну торгівлю з країнами Європейського Союзу.

Таблиця 3.16

Соціально-економічний та викидоємний профіль Західних та Північних регіонів за 2023 рік

Показник	Західні регіони	Північні регіони	Середній показник по країні
Частка національних викидів CO ₂ (%)	12–15%	8–10%	100%
Частка промислового виробництва (%)	15–18%	10–12%	—
Частка зайнятості у сфері послуг (%)	50–60%	45–55%	50%
Частка сільського та лісового господарства (%)	25–30%	30–35%	20–25%
Енергоємність (порівняно з промисловими регіонами)	50–60% нижча	40–50% нижча	—

Джерело: складено автором за [10,14]

Західні та Північні регіони України характеризуються лише низьким рівнем викидів CO₂, що зумовлено меншою частиною важкої промисловості та більшою орієнтацією на сферу послуг і аграрний сектор. Висока частка зайнятості у сфері послуг формує менш енергоємну економічну структуру, що позитивно впливає на вуглецеву інтенсивність. Водночас значна роль сільського та лісового господарства відкриває потенціал для розвитку природних поглиначів вуглецю. Нижчий рівень енергоємності зберігається з індустріальними регіонами продуктів про сприятливі умови для впровадження політики декарбонізації з меншими витратами. Загалом ці регіони можуть стати платформою для розвитку «зеленої» економіки та пілотних кліматичних ініціатив.

Визначальною рисою цих регіонів є їхній сильний інтеграційний потенціал з європейськими енергетичними та кліматичними рамками. Географічна близькість до держав-членів ЄС сприяє транскордонній співпраці в проектах відновлюваної енергетики, моніторингу навколишнього середовища та модернізації інфраструктури.

Таблиця 3.17

Індикатори транскордонної інтеграції та співпраці в енергетичній сфері

Індикатор	Значення	Інтерпретація
Частка транскордонної торгівлі з ЄС (%)	60–70%	Високий Інтеграція з ЄС
Кількість транскордонних енергетичних проєктів	20+	Активна співпраця
Доступ до програм фінансування ЄС	Високий	Сильна фінансова підтримка
Синхронізація мережі з ENTSO-E	Досягнуто (Україна)	Стратегічна інтеграція
Спільні ініціативи з відновлюваної енергетики	Зростання	Розширення співпраці

Джерело: складено автором за [18,19]

Україна демонструє високий рівень інтеграції з європейським енергетичним простором, що особливо посилилося після синхронізації з ENTSO-E. Значна частка транскордонної торгівлі та збільшення кількості спільних проєктів свідчать про поглиблення енергетичного партнерства з ЄС. Доступ до фінансових інструментів Європейського Союзу створює сприятливі умови для модернізації інфраструктури та розвитку відновлюваної енергетики. Устроковій перспективі це сприяти підвищенню енергетичної безпеки, диверсифікації джерел енергії та прискоренню процесів декарбонізації. Україна поступово інтегрується в європейський енергетичний ринок не тільки технічно, але й інституційно.

Західна Україна також стала провідним регіоном з використання енергії з біомаси, зокрема завдяки значним лісовим ресурсам та сільськогосподарським відходам. Малі гідроелектростанції та установки сонячної енергії також розширюються, що підтримується як стимулами внутрішньої політики, так і міжнародними інвестиційними програмами.

Таблиця 3.18

Потужність та потенціал відновлюваної енергетики у Західному та Північному регіонах

Джерело енергії	Встановлена частка (%)	Технічний потенціал	Тенденція розвитку
Біомаса	20–25%	Високий	Швидке зростання
Сонячна енергія	Середньо-високий	Середньо-високий	Розширюється
Мала гідроенергетика	10–15%	Середній	Стабільний
Вітроенергетика	5–10%	Середньо-високий (Карпати)	Зростає
Загальна частка відновлюваної енергетики в регіональному енергетичному балансі	25–35%	Висока	Зростає

Джерело: складено автором за [18,19]

Західні та Північні регіони України мають сприятливу ресурсну базу для розвитку відновлюваної енергетики, зокрема біоенергетики та малої гідроенергетики. Висока частка біомаси обумовлена значними лісовими та аграрними ресурсами, що створює передумови для розвитку локальних енергетичних систем. Сонячна та вітрова енергетика демонструють поступове зростання, особливо в Карпатському регіоні, де природні умови є сприятливими для вітроенергетики. Загальна частка ВДЕ вже досягає високих значень, що робить ці регіони лідерами «зеленої» трансформації в Україні. Устрокові довгострокові перспективи сприяють зниженню вуглецевої інтенсивності та підвищенню енергетичної автономності.

Північні регіони, особливо ті, що постраждали від постіндустріального занепаду, все більше зосереджуються на відновленні екосистем, лісовідновленні та рекультивациі земель як частині ширших стратегій декарбонізації.

Таблиця 3.19

Землекористування та потенціал поглинання вуглецю в північних регіонах

Індикатор	Значення	Наслідки
Лісове покриття (%)	30–40%	Значна ємність поглинання вуглецю
Річне поглинання вуглецю (млн т CO ₂ /рік)	5–8	Значне поглинання
Площа деградованих земель (%)	10–15%	Потенціал відновлення
Охоплення програмами лісовідновлення	60–70% цільових територій	Активна політика
Рівень занедбаності сільськогосподарських угідь	5–8%	Можливість відновлення екосистеми

Джерело: складено автором за [16,18]

Північні регіони України відіграють важливу роль у національному балансі поглинання вуглецю завдяки значній частині лісових екосистем. Високий рівень лісового покриття забезпечує стабільний природний поглинач CO₂, що є ключовим елементом політики кліматичної нейтральності. Водночас наявність деградованих та частково занедбаних земель формує додатковий потенціал для відновлення екосистем і розширення вуглецевих поглиначів. Високий рівень охоплення програмами лісовідновлення проти активної державної та регіональної політики у сфері сталого землекористування. У перспективі це дозволяє посилити роль регіону як природного «вуглецевого буфера» в національній кліматичній стратегії.

Як зазначається в академічних дослідженнях, «західні та північні регіони України демонструють найвищу адаптивність до низьковуглецевої трансформації завдяки сприятливим екологічним умовам, сильнішій динаміці інтеграції до ЄС та меншій залежності від вуглецевомістких галузей промисловості» [4, с. 120–138].

Тим не менш, навіть ці регіони стикаються з такими обмеженнями, як обмежена потужність мережі для інтеграції відновлюваних джерел енергії, нерівномірний розподіл інвестицій та адміністративні бар'єри для розгортання масштабної зеленої інфраструктури.

Таблиця 3.20

Ключові обмеження для декарбонізації у західних та північних регіонах

Обмеження	Очікуваний масштаб	Вплив
Обмеження потужності мережі	40–50% регіонів, на які впливає вплив	Уповільнює інтеграцію ВДЕ
Нерівномірний розподіл інвестицій	Високий	Регіональні відмінності
Адміністративні бар'єри	Середній–Високий	Затримує проекти
Відсутність великомасштабної інфраструктури	Середній	Обмежує розширення
Доступ до фінансування для малих проектів	Середній	Уповільнює місцеві ініціативи

Джерело: складено автором за [17]

Декарбонізація західних і північних регіонів України збільшується переважно інфраструктурними та інституційними обмеженнями, а не ресурсним потенціалом. Найбільш критичним фактором є обмеження пропускної здатності електромереж, що ускладнює інтеграцію нових відновлюваних потужностей. Нерівномірність інвестицій та адміністративні бар'єри створюють додаткові дисбаланси у швидкості реалізації проектів. Водночас дефіцит великомасштабної інфраструктури та стабільний доступ до фінансування для малих ініціатив уповільнюють розвиток децентралізованої енергетики. У сукупності ці фактори формують потребу в системному підході до модернізації мережі, спрощення регуляторних процедур та розширення фінансових інструментів підтримки.

3.3. Стратегічні перспективи декарбонізації глобальної циркулярної економіки в умовах цифрової трансформації та кліматичних викликів.

Майбутнє циркулярної економіки в декарбонізації залежить від впровадження проривних технологій, розробки сприятливої політики та фундаментальних змін у бізнес-моделях та поведінці споживачів. Нещодавні дослідження стратегій промислової декарбонізації, які прогнозують зростання попиту на матеріали на 300% до 2030 року, роблять циркулярні рішення дедалі актуальнішими для сталої декарбонізації.

Передові системи штучного інтелекту оптимізують складні циркулярні мережі, прогнозуючи матеріальні потоки, координуючи логістику та виявляючи

нові можливості для утилізації відходів. Алгоритми машинного навчання обробляють дані з датчиків, ринкових сигналів та мереж ланцюгів поставок, щоб забезпечити оптимізацію циклічних систем у режимі реального часу.

Системи сортування на базі штучного інтелекту досягають 99% точності в ідентифікації матеріалів, обробляючи 10-20 тонн на годину. Ці системи дозволяють економічно ефективно переробку складних потоків матеріалів, включаючи електроніку, композити та змішані пластики, які раніше вважалися неекономічними.

Ферменти, що розкладають пластик, досягають 90% розкладання ПЕТ-пластику протягом 24 годин у контрольованих умовах, що дозволяє переробляти матеріали на молекулярному рівні, зберігаючи їх початкову якість. Ці біологічні системи працюють за кімнатної температури, уникаючи агресивних хімікатів, необхідних для традиційної переробки.

Комплексне впровадження циклічної економіки може скоротити світовий видобуток матеріалів на 28%, зберігаючи при цьому економічне зростання, демонструючи потенціал для відокремлення споживання ресурсів від процвітання. Ця трансформація вимагає скоординованих дій у технологічному, політичному та фінансовому секторах.

Ключові рушійні сили зростання:

- збільшення цін на вуглець, що створює економічні стимули для циркулярних практик;
- дефіцит ресурсів стимулює інновації в технологіях відновлення та заміщення;
- зсув споживчого попиту в бік стійких моделей продуктів та послуг;
- нормативні вимоги, що вимагають циркулярного проектування та цілей відновлення;
- інтеграція циркулярних показників у фінансовий сектор в інвестиційні рішення;

Організації повинні розробляти інтегровані циркулярні стратегії, що поєднують технологічні інновації, трансформацію бізнес-моделей та залучення зацікавлених сторін у всіх мережах створення цінності. Успіх вимагає довгострокових зобов'язань та готовності до переосмислення фундаментальних бізнес-процесів.

Пріоритетні напрямки діяльності:

- ⇒ розвиток циркулярних можливостей через стратегічні партнерства дозволяє спільне інвестування та розподіл ризиків, одночасно отримуючи доступ до спеціалізованої експертизи. Інвестиції в технології Організації повинні надавати пріоритет масштабованим рішенням з продемонстрованою економічною доцільністю та впливом на навколишнє середовище;
- ⇒ активна участь у розробці політики та створенні галузевих стандартів формує сприятливі рамки, одночасно позиціонуючи організації для дотримання нормативних вимог та конкурентних переваг. Раннє впровадження циркулярних практик створює переваги першопрохідців на ринках, що розвиваються;
- ⇒ крім того, організації повинні розглядати інновації у сфері рекультивациі шахт як частину своїх циркулярних стратегій, забезпечуючи сталий видобуток ресурсів, що відповідає принципам циркулярної економіки;
- ⇒ програми культурної трансформації залучають співробітників та клієнтів до принципів циркулярної економіки, одночасно розвиваючи організаційні можливості для системного мислення та оптимізації життєвого циклу. Ці програми створюють стійкі конкурентні переваги завдяки вбудованим циркулярним компетенціям.

Циркулярна економіка в декарбонізації являє собою трансформаційний підхід, який фундаментально переосмислює те, як суспільства управляють ресурсами, прагнучи досягти кліматичних цілей. На відміну від традиційних лінійних моделей, які дотримуються схеми «взяти-виготовити-утилізувати», циркулярні системи створюють замкнені цикли, де матеріали безперервно циклічно

переходять через продуктивне використання, усуваючи відходи та водночас різко зменшуючи викиди парникових газів.

Цей зсув парадигми вирішує критичну проблему, світовий попит на корисні копалини енергетичного переходу може досягти 40 мільйонів тонн до 2040 року, що потенційно може створити нову залежність від ресурсів, яка підриває декарбонізацію гірничодобувних робіт. Циркулярна економіка в декарбонізації пропонує шлях до розриву цього циклу шляхом максимізації збереження матеріальної цінності та мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Основні принципи циркулярної декарбонізації:

⇒ Циркулярна декарбонізація працює за чотирма взаємопов'язаними принципами, які оптимізують потоки ресурсів, одночасно зменшуючи викиди вуглецю. Ці фундаментальні елементи створюють регенеративні системи, які підтримують економічну продуктивність, не виснажуючи природні ресурси.

⇒ Регенерація ресурсів є основою циркулярних систем, розрізняючи біологічні поживні речовини, які безпечно повертаються до природних циклів, та технічні матеріали, які безкінечно циркулюють через людські системи. Таке розділення гарантує, що матеріали зберігають свою найвищу цінність, уникаючи забруднення, яке зазвичай погіршує процеси переробки.

⇒ Усунення відходів відбувається за допомогою стратегій проектування, які передбачають усі життєві цикли продукту, включаючи протоколи розбирання та модульні архітектури, що дозволяють відновлювати та повторно використовувати компоненти. Цей підхід перетворює традиційні потоки відходів на цінні вхідні матеріали для нових виробничих циклів.

⇒ Збереження вартості розширює корисність продукту завдяки платформам спільного використання, ремонтним послугам, програмам реконструкції та процесам відновлення, які відновлюють продукти до стану, подібного до нового. Ці стратегії затримують цикл матеріалообігу, максимізуючи економічну віддачу від існуючих ресурсів.

⇒ Оптимізація системи використовує цифрові технології, включаючи прогнозу аналітику, відстеження блокчейну та штучний інтелект в оптимізації видобутку, для координації складних потоків матеріалів між кількома зацікавленими сторонами, зменшуючи неефективність та викиди від транспорту.



Рис. 3.2 Структурно-логічна модель впливу циркулярної економіки на скорочення викидів вуглецю

Джерело: складено автором

Рисунок 3.2 відображає структурно-логічний механізм впливу циркулярної економіки на процеси декарбонізації та скорочення викидів парникових газів. У схемі показано, що циркулярна економіка функціонує як інтегрований інструмент низьковуглецевої трансформації, орієнтований на мінімізацію використання первинних ресурсів, підвищення ресурсоефективності та зменшення екологічного навантаження на всіх етапах життєвого циклу продукції.

У межах моделі виділено основні механізми скорочення викидів CO₂, серед яких зниження потреби у первинній сировині, повторне використання та продовження життєвого циклу продукції, розвиток переробки матеріалів, оптимізація логістичних процесів, підвищення енергоефективності та запобігання утворенню відходів. Окремий блок схеми присвячений ключовим напрямкам реалізації циркулярної економіки, включаючи екодизайн, розвиток циркулярних бізнес-моделей, цифровізацію управління ресурсами та формування інфраструктури вторинної переробки.

Логічним результатом взаємодії зазначених механізмів є комплексне скорочення викидів парникових газів, підвищення ресурсної ефективності економіки, стимулювання інновацій та формування стійкої низьковуглецевої моделі розвитку. Схема демонструє системний взаємозв'язок між циркулярною економікою, технологічною модернізацією та процесами глобальної декарбонізації.

Циркулярна економіка в умовах декарбонізації забезпечує значну економію вуглецю завдяки кільком шляхам, які враховують як прямі викиди від промислових процесів, так і непрямі викиди, вбудовані в усі ланцюги поставок. Дослідження показують, що ці підходи можуть скоротити глобальні викиди парникових газів до 39% завдяки стратегічному управлінню матеріалами та оптимізації життєвого циклу.

Циклінг матеріалів усуває енергоємні види діяльності з видобутку та переробки, які генерують значні викиди вуглецю. Наприклад, виробництво первинного алюмінію потребує в 15 разів більше енергії, ніж переробка

переробленого алюмінію, тоді як виробництво переробленої сталі споживає на 75% менше енергії, ніж первинне виробництво сталі із залізної руди.

Переробка критично важливих мінералів пропонує особливо значні переваги для технологій декарбонізації. Процеси біовилуговування для відновлення електронних відходів споживають на 85% менше енергії, ніж традиційна плавка, одночасно усуваючи токсичні викиди, які зазвичай супроводжують пірометалургійну обробку. Ці біологічні системи використовують мікроорганізми для вилучення цінних матеріалів, включаючи рідкоземельні елементи, золото та метали платинової групи, з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Однак, переробка рідкоземельних елементів «магніт-магніт» є ще однією проривною технологією, яка підтримує чистоту матеріалу, уникаючи при цьому екологічно руйнівних гірничих робіт. Цей замкнутий підхід дозволяє вилучити неодим, диспрозій та інші критично важливі елементи безпосередньо з постійних магнітів, усуваючи потребу в новому видобутку, який зазвичай передбачає обробку радіоактивного торію.

Циркулярна економіка в декарбонізації особливо добре справляється з викидами категорії 3, які виникають у всіх ланцюгах створення вартості, але залишаються поза прямим організаційним контролем. Ці непрямі викиди часто становлять 70-90% від загального вуглецевого сліду підприємств, що робить циркулярні стратегії важливими для комплексної декарбонізації.

Збільшення терміну служби продукції завдяки програмам ремонту та реконструкції затримує цикли заміни, зменшуючи попит на виробництво та пов'язані з цим викиди. Стратегії продовження терміну служби промислового обладнання можуть зменшити вуглецевий слід на 30-50%, зберігаючи при цьому експлуатаційні показники завдяки прогнозованому технічному обслуговуванню та модернізації компонентів.



Рис. 3.3. Ключові циркулярні технології як інструменти декарбонізації економіки

Джерело: складено автором

Основні циркулярні технології, що сприяють скороченню викидів парникових газів та формуванню низьковуглецевої моделі економічного розвитку представлені на рисунку 3.3. У центрі схеми знаходиться взаємозв'язок між циркулярною економікою та декарбонізацією, тоді як окремі блоки відображають технологічні напрями, що забезпечують підвищення ресурсоефективності та зниження вуглецевої інтенсивності виробництва.

Особливу роль відіграють цифрові та інтелектуальні технології, які забезпечують моніторинг ресурсних потоків, автоматизацію енергетичних систем та оптимізацію управління викидами. У результаті циркулярні технології формують комплексний ефект декарбонізації, поєднуючи екологічні, технологічні та економічні механізми модернізації виробництва і споживання.

Технологічні інновації стимулюють циркулярну економіку в декарбонізації завдяки проривним процесам, які максимізують відновлення матеріалів,

мінімізуючи вплив на навколишнє середовище. Ці технології усувають критичні вузькі місця в традиційних системах переробки, сприяючи появі нових циркулярних бізнес-моделей.

Системи біологічного відновлення матеріалів представляють собою зміну парадигми від енергоємних механічних та термічних процесів до біологічного вилучення з низьким впливом. Ці системи використовують спеціалізовані мікроорганізми, включаючи ацидофільні бактерії, які природним чином концентрують та відокремлюють цінні матеріали від складних матриць відходів.

Нещодавні досягнення в біовилуговуванні дозволяють обробляти електронні відходи при кімнатній температурі, досягаючи при цьому коефіцієнта відновлення, що перевищує 95% для дорогоцінних металів та рідкоземельних елементів. Процес усуває токсичні викиди, пов'язані з високотемпературною плавкою, вимагаючи при цьому мінімальних витрат енергії, окрім базової аерації та контролю рН.

Пряма переробка постійних магнітів вирішує критичні проблеми вразливості ланцюга постачання мінералів, одночасно усуваючи вплив на навколишнє середовище від первинного видобутку рідкоземельних елементів. Ця технологія обробляє магніти з кінця терміну служби з вітрових турбін, електромобілів та побутової електроніки, не руйнуючи структуру магнітного матеріалу.

Процес підтримує магнітні характеристики, еквівалентні первинним матеріалам, одночасно зменшуючи енергоспоживання на 80% порівняно з традиційним переробленням рідкоземельних елементів. Цей підхід стає дедалі ціннішим, оскільки, за прогнозами, світовий попит на рідкоземельні елементи потроїться до 2030 року для застосування в чистій енергії.

Системи машинного навчання оптимізують циклічні потоки матеріалів, аналізуючи моделі попиту, виявляючи вузькі місця та координуючи мережі постачання для мінімізації відходів та викидів від транспортування. Ці платформи

обробляють дані в режимі реального часу від датчиків, ринкових сигналів та логістичних мереж, щоб забезпечити динамічний розподіл ресурсів.

Удосконалені алгоритми можуть зменшити кількість відходів матеріалів на 25-40% завдяки покращеному прогнозуванню попиту та оптимізації запасів. Викиди від транспортування зменшуються на 30-60% завдяки оптимізації маршрутів та консолідації вантажів у циклічних мережах постачання.

Системи блокчейну підтримують сертифіковані програми переробки, надаючи захищені від несанкціонованого втручання записи про походження матеріалів та історію обробки. Ця прозорість дозволяє встановлювати преміальні ціни на перевірені циркулярні матеріали, одночасно зменшуючи шахрайство на ринках переробки.



Рис. 3.4. Галузева структура впливу циркулярної декарбонізації на промисловий розвиток

Джерело: складено автором

Рисунок 3.4. відображає структурно-логічну модель впливу циклічної декарбонізації на різні галузі промисловості та демонструє ключові напрями їхньої низьковуглецевої трансформації. У схемі показано, що найбільшу вигоду від впровадження принципів циркулярної економіки отримують металургія, цементна, хімічна, нафтопереробна, текстильна, автомобільна промисловість та сектор будівельних матеріалів.

Для кожної галузі визначено основні механізми декарбонізації, серед яких використання вторинної сировини, рециклінг матеріалів, впровадження енергоефективних технологій, розвиток альтернативного палива, екодизайн продукції, промислова симбіозність та застосування технологій уловлювання і зберігання вуглецю. Окрему роль відіграють цифрові технології та циркулярні виробничі моделі, які забезпечують оптимізацію ресурсних потоків та скорочення матеріальної й енергетичної інтенсивності виробництва.

Вказано на комплексні економічні ефекти циклічної декарбонізації, включаючи зниження викидів парникових газів, підвищення ресурсоефективності, розвиток інновацій, формування нових циркулярних ланцюгів створення вартості та посилення конкурентоспроможності промисловості. Циклічна декарбонізація розглядається як стратегічний механізм модернізації промислового сектору та переходу до стійкої низьковуглецевої економіки.

Окремі галузі промисловості демонструють винятковий потенціал для циркулярної економіки в декарбонізації завдяки своїй матеріалоемності, налагодженим ланцюгам постачання та економічним стимулам для відновлення ресурсів. Ці сектори служать полігонами для циклічних технологій, водночас забезпечуючи значну економію вуглецю.

Індустрія акумуляторів є прикладом успішної циклічної декарбонізації завдяки комплексним стратегіям управління життєвим циклом, які враховують критичні ризики постачання матеріалів. Оскільки попит на акумулятори, як

прогнозується, зросте в 10 разів до 2030 року для електромобілів та мережевого зберігання енергії, циклічні підходи стають важливими для сталого масштабування.

Сучасні проривні процеси переробки акумуляторів досягають 95% коефіцієнта відновлення літію, кобальту та нікелю завдяки передовим гідрометалургійним процесам. Ці матеріали зберігають достатню чистоту для безпосереднього повторного використання у виробництві нових акумуляторів, створюючи замкнуті ланцюги поставок, які зменшують залежність від видобутку корисних копалин.

Технології прямої переробки зберігають цілісність катодного матеріалу, зберігаючи 90% початкової продуктивності акумулятора, одночасно зменшуючи енергоспоживання на 60% порівняно з традиційними пірометалургійними методами.

Майбутнє глобальної декарбонізації визначатиметься взаємодією між технологічними інноваціями, геополітичною конкуренцією, фінансовою реструктуризацією та ескалацією кліматичних ризиків. Очікується, що як Європа, так і Азія залишатимуться центральними учасниками цього процесу, але їхні траєкторії дедалі більше збігатимуться через глобальні ланцюги поставок, механізми регулювання викидів вуглецю та міжнародні рамки управління кліматом. Водночас перехід стане складнішим через зростання системних витрат, обмеження ресурсів та нерівномірну динаміку розвитку [1, с. 74–83].

Майбутній шлях декарбонізації формується кількома довгостроковими структурними тенденціями, які вже формуються в Європі та Азії. Однією з найважливіших тенденцій ваажається подальше швидке розширення відновлюваної енергетики, зокрема сонячної та вітрової. Технологічні вдосконалення, зниження витрат та ефекти масштабування зробили відновлювані джерела енергії найконкурентнішим джерелом енергії в багатьох регіонах.

Ключовим розвитком є перехід від централізованих енергетичних систем до розподілених енергетичних екосистем, де домогосподарства, міста та

промисловість стають активними виробниками електроенергії. Очікується, що ця тенденція переосмислить традиційні бізнес-моделі комунальних підприємств та підвищить важливість інтелектуальних мереж і цифрових систем управління енергією (Таблиця 3.21) [2, с. 55–64].

Таблиця 3.21

Глобальні тенденції розширення відновлюваної енергетики (2020–2025)

Показник	2020	2025 (орієнтовно)	Тенденція зростання
Глобальна потужність сонячної енергії (ГВт)	760	1800	+136%
Глобальна потужність вітрової енергії (ГВт)	740	1400	+89%
Частка відновлюваних джерел енергії у світовому виробництві електроенергії	29%	42%	+13 в.п.
Зниження вартості сонячної фотоелектричної енергії	-	-60% (з 2015 року)	Постійне зниження
Частка розподілених енергетичних систем	10%	25%	Швидке розширення

Джерело: складено автором за [110, 112]

Глобальний розвиток відновлюваної енергетики у 2020–2025 роках демонструє прискорену структурну трансформацію світової енергетичної системи. Найбільш динамічне зростання у сонячній та вітровій енергетиці, що зумовлено зниженням вартості технологій та масштабуванням інвестицій. Зростання частки відновлюваних джерел у виробництві електроенергії та розвитку розподілу енергетичних систем свідчать про поступовий перехід до більш децентралізованої та стійкої енергетичної моделі.

Ще однією важливою тенденцією є широке поширення електрифікації секторів кінцевого споживання, включаючи транспорт, опалення та промислові процеси. Електромобілі, теплові насоси та промислові електричні печі стають центральними технологіями в процесі декарбонізації.

Електрифікація значно збільшує попит на електроенергію, що, у свою чергу, прискорює впровадження відновлюваних джерел енергії. Це створює підсилювальну петлю зворотного зв'язку, відому як «цикл електрифікації-

декарбонізації», де чиста електроенергія дозволяє подальше скорочення викидів у всіх секторах.

Очікується, що зелений водень стане критично важливим енергоносієм для важко декарбонізованих секторів, таких як виробництво сталі, судноплавство, авіація та хімічна промисловість. Європа зосереджується на імпорті та регулюванні ринків водню, тоді як Азія, зокрема Китай, Японія та Південна Корея, значно інвестує у виробництво водню та розвиток інфраструктури [3, с. 91–99]. Очікується також, що водень відіграватиме стратегічну геополітичну роль, подібну до нафти у 20 столітті, потенційно змінюючи глобальні торговельні шляхи енергетики.

Штучний інтелект, аналітика великих даних та технології Інтернету речей трансформують системи управління енергією. Розумні мережі, прогнозна оптимізація енергії та автоматизовані системи реагування на попит підвищують ефективність та зменшують втрати.

Такі країни, як Сінгапур, Південна Корея та Німеччина, є лідерами в інтеграції цифрових технологій у національні енергетичні системи, створюючи високоадаптивну та стійку інфраструктуру [4, с. 38–46].

Очікується, що механізми ціноутворення на вуглець розширяться в усьому світі. Модель EU ETS все більше впливає на інші регіони, включаючи частини Азії. Майбутні розробки можуть включати взаємопов'язані ринки вуглецю, транскордонні системи оподаткування вуглецю та гармонізовані стандарти звітності про викиди, про що вказано у таблиці 3.22

Таблиця 3.22

Огляд довгострокових глобальних тенденцій декарбонізації

Тенденція	Швидкість розвитку	Роль Європи	Роль Азії
Розширення відновлюваної енергетики	Дуже високий	Лідер у регуляторній сфері	Лідер у виробництві
Електрифікація	Високий	Орієнтований на політику	Орієнтований на попит
Воднева економіка	Високий	Високий Дизайн ринку	Масштаби виробництва

Цифровізація	Дуже високий	Стандарти	Впровадження
Ціноутворення на вуглець	Середній	Світовий лідер	Країни, що розвиваються Впровадження

Джерело: складено автором за [110]

Довгострокові тенденції глобальної декарбонізації демонструють формування функціонального поділу між Європою та Азією. Європейський Союз виступає регуляторним та інституційним лідером, формуючи стандарти, правила та ринкові механізми, зокрема у сфері ціноутворення на вуглець. Азія, своєю чергою, є головним виробничим та інвестиційним центром, який забезпечує масштабування технологій і забезпечує зростаючий попит на енергію. Такий розподіл ролей формує взаємозалежну глобальну модель енергетичного переходу.

Незважаючи на позитивні тенденції, глобальний процес декарбонізації стикається зі значними структурними ризиками та бар'єрами, які можуть уповільнити або спотворити перехід.

Багато ключових технологій, необхідних для глибокої декарбонізації, залишаються на ранніх або середніх стадіях розвитку. До них належать великомасштабні системи накопичення енергії, пряме уловлювання вуглецю з повітря, передовий ядерний синтез (довгостроковий), інфраструктура зеленого водню промислового масштабу. Невизначеність щодо траєкторій зниження витрат та масштабованості залишається основною перешкодою для інвестиційних рішень [5, с. 66–74].

Перехід до низьковуглецевої економіки вимагає величезної кількості критично важливих мінералів, таких як літій, кобальт, нікель та рідкоземельні елементи. Ланцюги постачання сильно зосереджені в кількох країнах, зокрема в Азії та частинах Африки.

Це створює геополітичні ризики та потенційні вузькі місця в виробництві акумуляторів, виробництві обладнання для відновлюваної енергії, ланцюгах постачання електромобілів.

Залежність від ресурсів може стати новою формою стратегічної вразливості, подібною до залежності від викопного палива в минулому [6, с. 102–110].

Декарбонізація створює нерівномірний економічний вплив на різні регіони та соціальні групи. Енергоємні галузі промисловості стикаються з вищими витратами, тоді як регіони, що залежать від викопного палива, ризикують економічним спадом.

Основні проблеми включають зменшення робочих місць у вугільному та нафтовому секторах, зростання цін на енергоносії для домогосподарств, регіональна нерівність між промисловими та постіндустріальними регіонами. Без належних механізмів компенсації ця нерівність може призвести до політичного опору кліматичній політиці.

Навіть за наявності амбітних кліматичних цілей, їх впровадження часто відстає через адміністративну неефективність, політичні цикли та інституційну фрагментацію. Це особливо очевидно у великих та різноманітних регіонах, де координація між національними та регіональними органами влади є складною.

Для забезпечення успішного та збалансованого процесу глобальної декарбонізації можна визначити кілька стратегічних напрямків політики (рис.3.5).



Рис. 3.5. Стратегічні напрями формування низьковуглецевої циркулярної економіки

Джерело: складено автором

Глобальні рамки співпраці, такі як Паризька угода, слід посилити шляхом стандартизованих систем обліку вуглецю, вдосконалених механізмів прозорості, розширених зобов'язань щодо звітності щодо клімату.

Більш скоординована система глобального управління зменшить фрагментацію політики та підвищить ефективність скорочення викидів [7, с. 58–66].

Країни, що розвиваються, в Азії потребують значної фінансової підтримки для прискорення свого енергетичного переходу. Це включає пільгове фінансування, розширення зелених облігацій, багатосторонні кліматичні фонди, державно-приватні інвестиційні партнерства. Європа та міжнародні установи повинні відігравати провідну роль у мобілізації довгострокових потоків капіталу.

Подолання технологічного розриву між розвиненими та країнами, що розвиваються, є надзвичайно важливим. Цього можна досягти за допомогою міжнародної дослідницької співпраці, платформ чистих технологій з відкритим доступом, спільних промислових інноваційних зон між Європою та Азією. Поширення технологій має вирішальне значення для скорочення глобальних викидів у великих масштабах.

Диверсифікація критично важливих ланцюгів поставок корисних копалин необхідна для зменшення геополітичних ризиків. Політичні заходи повинні включати переробку та розвиток циркулярної економіки, стратегічні запаси корисних копалин, інвестиції в дослідження альтернативних матеріалів.

Соціальна стабільність є ключовою умовою успішної декарбонізації. Уряди повинні впроваджувати програми перепідготовки працівників у галузях викопного палива, регіональні фонди розвитку, цільові схеми соціального захисту, інклюзивну політику ціноутворення на енергоносії. Підхід справедливого переходу гарантує, що кліматична політика залишатиметься політично стійкою [8, с. 120–128].

Враховуючи свій глобальний вплив, Європа та Азія повинні зміцнювати двосторонню та багатосторонню співпрацю у інтеграції ринків вуглецю, розвитку

торгівлі воднем, стандартах зелених технологій, спільних системах оцінки кліматичних ризиків. Потенційні сфери співпраці наведені у таблиці 3.22. Така співпраця значно підвищить ефективність глобальних зусиль з декарбонізації.

Таблиця 3.22

Потенційні сфери співпраці ЄС-Азія (перспектива на 2024–2030 роки)

Сфера співпраці	Поточний рівень	Очікується до 2030 року	Стратегічне значення
Зв'язок з ринком вуглецю	Низький	Середній–Високий	Дуже високий
Коридори торгівлі воднем	Новини	Високий	Високий
Стандарти зелених технологій	Середній	Високий	Дуже високий
Координація фінансування кліматичних заходів	Середній	Високий	Високий
Стійкість ланцюга поставок	Низький–Середній	Середній–Високий	Дуже високий

Джерело: складено автором за [110 - 115]

Перспективна співпраця між Європейським Союзом та Азією у сфері клімату формується навколо посилення інституційної, технологічної та фінансової взаємодії. Найбільш стратегічно значущими напрямками є гармонізація стандартів «зелених» технологій та підвищення стійкості глобальних ланцюгів постачання, що разом впливає на стабільність енергетичного переходу. Розвиток водних коридорів та поступова інтеграція ринків вуглецю можуть стати ключовими елементами нової архітектури глобальної декарбонізації до 2030 року.

Успішне впровадження циркулярної економіки в рамках декарбонізації вимагає систематичних підходів, що інтегрують циркулярне мислення в усі бізнес-операції, ланцюги поставок та відносини з клієнтами. Організації повинні розробляти комплексні стратегії, що вирішують технічні, економічні та організаційні проблеми, одночасно використовуючи нові можливості.

Комплексний аналіз матеріальних потоків забезпечує основу для розробки циркулярної стратегії шляхом кількісної оцінки вхідних ресурсів, процесів трансформації та вихідних потоків. Ця оцінка визначає можливості оптимізації та встановлює базові вимірювання вуглецевої інтенсивності в усіх операціях.

Організації повинні аналізувати викиди 1, 2 та 3, приділяючи особливу увагу впливу на ланцюг поставок вище за течією та управлінню кінцевим терміном служби. Картування матеріальних потоків виявляє приховані залежності від критично важливих матеріалів та виявляє вразливість до збоїв у ланцюзі поставок.

Розробка продукту повинна враховувати принципи циркулярної економіки від концептуальних етапів до виведення на ринок, враховуючи довговічність, ремонтпридатність, можливість модернізації та відновлення після закінчення терміну служби. Проектування з урахуванням циклічності зазвичай вимагає 15-25% додаткових початкових інвестицій, але забезпечує 200-400% прибутку завдяки подовженому терміну служби продукту та цінності відновлення матеріалів.

Циркулярні системи вимагають мереж співпраці, що охоплюють постачальників, клієнтів, переробників та постачальників технологій. Ці партнерства дозволяють створювати спільні інвестиції в інфраструктуру, розподіляти ризики та скоординувати потоки матеріалів, чого окремі організації не можуть досягти самостійно.

Нами запропоновано дорожню карту впровадження процесів декарбонізації.

Критичний фактор успіху передбачає, що циркулярна економіка в умовах декарбонізації вимагає системного мислення, яке оптимізує цілі мережі створення вартості, а не окремі процеси чи продукти, вирішуючи проблему прогнозованого потроєння попиту на мінеральні ресурси енергетичного переходу до 2030 року.

Негайні дії (0-2 роки):

- комплексний аудит потоків відходів та визначення можливостей для їх оцінки;
- програми залучення постачальників для партнерства з постачання циркулярних матеріалів;
- огляди дизайну продукції з урахуванням довговічності та завершення терміну служби;

- розробка пілотного проекту, що демонструє життєздатність циркулярної бізнес-моделі.

Середньострокові трансформації (2-5 років):

- переробка ланцюга поставок для регіональних циклів обігу матеріалів;
- інвестиції в технології інфраструктури для відновлення та переробки;
- програми залучення клієнтів, що сприяють довговічності та поверненню продукції;
- інтеграція показників ефективності, що відстежують результати циркулярної економіки.

Довгострокова системна інтеграція (5+ років):

- лідерство в галузевій екосистемі та ініціативи з розробки стандартів;
- значні інвестиції в інфраструктуру спільних циклічних переробних потужностей;
- політична адвокація для сприятливих нормативно-правових баз;
- інноваційні партнерства, що просувають проривні циркулярні технології.

Циркулярна економіка в умовах декарбонізації генерує суттєві економічні вигоди завдяки скороченню витрат, диверсифікації доходів та пом'якшенню ризиків. Ці фінансові переваги часто перевищують початкові інвестиційні потреби протягом 2-4 років, водночас забезпечуючи довгострокові конкурентні переваги завдяки безпеці ресурсів та дотриманню нормативних вимог.

Циркулярні стратегії забезпечують негайну економію завдяки зменшенню витрат на закупівлю матеріалів, споживання енергії та утилізацію відходів. Організації, які впроваджують комплексні програми циркулярної економіки, зазвичай досягають скорочення витрат на сировину на 15-40%, одночасно покращуючи екологічні показники.

Економія енергії від циклічних процесів з часом зростає, оскільки організації оптимізують потоки матеріалів та зменшують вимоги до обробки. Виробництво переробленого алюмінію споживає на 95% менше енергії, ніж первинне

виробництво, тоді як виробництво переробленого паперу використовує на 40% менше енергії, ніж переробка первинного волокна.

Високоцінні матеріали, видобуті з потоків відходів, створюють нові можливості для отримання доходу, одночасно знижуючи витрати на утилізацію та ризику ланцюжка поставок. Переробка електронних відходів може відновити 50-100 доларів США за тону дорогоцінних металів, тоді як відновлення рідкоземельних елементів з постійних магнітів генерує 15-25 доларів США за кілограм вартості матеріалу.

Критично важливі матеріали стикаються з особливо сильним ринковим попитом, оскільки виникають вразливості ланцюжка поставок. Дефіцит срібла, спричинений розширенням сонячної фотоелектричної енергетики, створює можливості для преміального ціноутворення на перероблене срібло, тоді як обмеження поставок кобальту та нікелю збільшують вартість перероблених матеріалів.

Пропозиції «продукт як послуга» генерують постійний дохід, зберігаючи контроль над активами та оптимізуючи коефіцієнти використання через платформи спільного використання. Ці моделі зазвичай збільшують дохід на актив на 50-200%, одночасно зменшуючи вимоги до капіталу клієнтів та покращуючи операційну гнучкість.

Програми «обладнання як послуга» у виробництві генерують на 25-40% вищу маржу, ніж традиційні моделі продажів, водночас гарантуючи повернення продукції для ремонту та відновлення матеріалів. Такий підхід створює довгострокові відносини з клієнтами, водночас зберігаючи цінність матеріалів, що виходять з експлуатації.

Підтверджене скорочення викидів завдяки циркулярним практикам генерує вуглецеві кредити, які можна торгувати, забезпечуючи додаткові потоки доходів. Високоякісні проекти циркулярної економіки можуть генерувати кредити вартістю 15-50 доларів США за тону CO₂ залежно від методології та ринкових умов.

Проекти заміщення матеріалів та продовження терміну служби відповідають вимогам сертифікації вуглецевих кредитів за кількома стандартами, включаючи протоколи «Підтверджений вуглецевий стандарт» та «Золотий стандарт». Ці кредити забезпечують постійний дохід, одночасно підтримуючи корпоративні зобов'язання щодо сталого розвитку.

Ефективні політичні рамки створюють сприятливі умови для циркулярної економіки в процесі декарбонізації за допомогою регуляторних вимог, економічних стимулів та координації державних інвестицій. Ці політики усувають ринкові збої, які перешкоджають оптимальним результатам циркулярного виробництва, одночасно прискорюючи впровадження приватним сектором.

Комплексні схеми РВВ вимагають від виробників управління всіма життєвими циклами продукції, створюючи потужні економічні стимули для циркулярного проектування та систем утилізації відходів після закінчення терміну служби. Ці політики інтерналізують витрати на утилізацію, одночасно генеруючи фінансування для розвитку інфраструктури переробки.

Директива Європейського Союзу про розширену відповідальність виробника охоплює 85% продукції за вагою, включаючи електроніку, акумулятори, упаковку та текстиль. Плата за РВВ зазвичай коливається від 2 до 8% від вартості продукції, що робить циркулярний дизайн економічно привабливим порівняно з відповідальністю за витрати на утилізацію.

Податки на вуглець та системи торгівлі викидами враховують екологічні зовнішні ефекти в ринкових рішеннях, роблячи циркулярні підходи економічно конкурентоспроможними з лінійними альтернативами. Ціни на вуглець, що перевищують 50 доларів США за тонну CO₂, створюють потужні стимули для стратегій кругообігу матеріалів та продовження терміну служби.

Система торгівлі викидами Європейського Союзу охоплює 40% регіональних викидів парникових газів, причому ціни на вуглець досягнуть 90

доларів США за тонну у 2024 році. Ці цінові сигнали стимулюють інвестиції в циркулярні технології, водночас караючи марнотратні лінійні практики.

Купільна спроможність уряду створює попит на циркулярні продукти та послуги, демонструючи ринкову життєздатність для впровадження приватним сектором. Державні закупівлі становлять 12-20% ВВП у розвинених країнах, забезпечуючи значний масштаб ринку для циркулярних інновацій.

Політика циркулярних закупівель надає пріоритет довговічності, ремонтпридатності та потенціалу відновлення матеріалів, а не найнижчій початковій вартості. Ці вимоги стимулюють розвиток ринку циркулярних продуктів, демонструючи створення довгострокової цінності завдяки підходам, що базуються на сукупній вартості володіння.

Багатосторонні угоди координують розвиток циркулярного ланцюга поставок, одночасно зменшуючи геополітичні ризики завдяки диверсифікованим стратегіям постачання. Партнерство з безпеки корисних копалин включає 14 країн, які представляють основні регіони споживання та виробництва критично важливих матеріалів.

Ці партнерства сприяють передачі технологій, координації інвестицій та сприянню торгівлі для циркулярних потоків матеріалів. Спільні інвестиції в інфраструктуру знижують ризики для окремих країн, одночасно прискорюючи розгортання глобальної циркулярної економіки.

Передача технологій та нарощування потенціалу Міжнародна співпраця прискорює впровадження циркулярних технологій шляхом обміну знаннями, програм нарощування потенціалу та скоординованих інвестицій у дослідження. Інститути фінансування розвитку щорічно виділяють 10-15 мільярдів доларів на проекти циркулярної економіки на ринках, що розвиваються.

Програми трансферу технологій зосереджені на адаптивних рішеннях, включаючи технології переробки малого масштабу, обробку біоматеріалів та

системи цифрового відстеження. Ці програми розвивають місцевий потенціал, створюючи водночас глобальні ринки для циркулярних інновацій.

Незважаючи на значні потенційні переваги, циркулярна економіка в умовах декарбонізації стикається зі значними технічними, економічними та соціальними викликами, які вимагають скоординованих рішень для багатьох зацікавлених сторін. Розуміння цих бар'єрів дозволяє розробляти ефективнішу стратегію та зменшувати ризики.

Повторне перероблення може погіршити властивості матеріалів через забруднення, розрив полімерного ланцюга та зміни складу сплавів. Переробка пластику зазвичай досягає лише 2-3 циклів, перш ніж деградація матеріалу перешкоджає подальшому використанню, тоді як переробка металу зберігає властивості необмежений час за умови належного розділення.

Передові технології сортування, включаючи оптичне розпізнавання на основі штучного інтелекту та молекулярну ідентифікацію, можуть підтримувати вищу якість матеріалів завдяки покращеному контролю забруднення. Ці системи досягають рівня чистоти 95-99% порівняно з 80-90% для традиційних методів сортування.

Циркулярні системи потребують достатнього обсягу матеріалів для досягнення економічної ефективності, зберігаючи при цьому екологічні переваги завдяки скороченню транспортування. Для економічної життєздатності малих підприємств з переробки зазвичай потрібна річна потужність 50 000-100 000 тонн, що ускладнює розвиток локальних циклічних систем.

Регіональні моделі «вузли та спиці» координують місцевий збір з централізованою обробкою для досягнення необхідного масштабу, мінімізуючи вплив транспортування. Ці мережі зменшують відстані транспортування на 60-80% порівняно з традиційними централізованими системами.

Циркулярна інфраструктура вимагає значного початкового капіталу, терміни окупності якого часто перевищують 5-7 років порівняно з 2-3 роками для

традиційних альтернатив. Установки з переробки матеріалів потребують початкових інвестицій у розмірі 100-500 мільйонів доларів США залежно від технології та потужності.

Інноваційні механізми фінансування, включаючи зелені облігації та рішення для циклічної економіки, усувають капітальні бар'єри шляхом розподілу ризиків та розширеного прийняття терміну окупності. Ці інструменти щорічно забезпечують 50-100 мільярдів доларів фінансування циркулярної економіки в усьому світі.

Успішні циркулярні системи залежать від прийняття споживачами поведінки щодо спільного використання, ремонту та повернення, яка може суперечити уподобанням щодо зручності та психології власності. Готовність споживачів платити премії за циркулярні продукти зазвичай коливається на 5-15% вище, ніж у традиційних альтернативах.

Освітні програми та структури стимулювання можуть пришвидшити зміну поведінки, демонструючи ціннісну пропозицію та зменшуючи бар'єри для участі. Програми повернення з системами депозитів досягають 80-95% показників повернення порівняно з 20-40% для програм добровільного повернення.

Ключовий виклик – це точне вимірювання впливу циркулярної економіки вимагає комплексних методологій оцінки життєвого циклу та прозорих стандартів звітності для перевірки прогнозованого потенціалу скорочення викидів на 39% за допомогою циркулярних підходів.

Обмежена доступність достовірних даних про потоки матеріалів, коефіцієнти переробки та вплив на навколишнє середовище перешкоджає прийняттю рішень та відстеженню прогресу. Облік потоків матеріалів існує лише для 60% критично важливих матеріалів зі значними прогалинами в даних про переробку та торгівлю.

Цифрові системи відстеження з використанням блокчейну та датчиків Інтернету речей можуть покращити якість даних, одночасно зменшуючи витрати на

звітність. Ці системи забезпечують видимість матеріальних потоків у режимі реального часу, автоматизуючи звітність про відповідність та перевірку впливу.

Відсутність універсальних метрик та стандартів звітності створює плутанину та перешкоджає ефективному порівнянню циркулярних ініціатив між організаціями та регіонами. Існує понад 200 різних показників циркулярної економіки без консенсусу щодо основних підходів до вимірювання.

Міжнародні зусилля зі стандартизації через ISO та інші органи спрямовані на встановлення узгоджених методологій вимірювання та звітності щодо циркулярної економіки. Ці стандарти дозволяють надійно кількісно оцінювати вплив та підтримувати інвестиційні рішення.

Висновки до 3 розділу.

З метою комплексного оцінювання ефективності декарбонізації в умовах циркулярної економіки запропоновано авторську інтегровану модель Індекс гібридної мобільності та декарбонізації «Hybrid Mobility and Decarbonization Index» чи НМДІ, яка поєднує екологічні, економічні та структурні параметри трансформації. Порівняльний аналіз індексу гібридної мобільності та декарбонізації свідчить про суттєві відмінності у моделях низьковуглецевої трансформації між Європейським Союзом, азійськими економіками та Україною. Ці відмінності формуються під впливом різного рівня технологічного розвитку, структури енергетичних систем, інституційної спроможності, ступеня інтеграції циркулярної економіки та масштабів цифровізації.

Обґрунтовано, що особливістю української моделі є те, що декарбонізація тісно поєднується з питаннями енергетичної безпеки, післявоєнної реконструкції та модернізації інфраструктури. На відміну від багатьох країн Азії, де головним драйвером декарбонізації виступає промислова конкурентоспроможність, або ЄС, де домінує кліматичне регулювання, в Україні основним стимулом

низьковуглецевого переходу дедалі більше стає необхідність енергетичної автономізації та відбудови стійкої економіки.

Результати розрахунку свідчать про нерівномірність декарбонізаційної трансформації. Найбільш слабким компонентом моделі залишається рівень циркулярності економіки (CE_n), оскільки в Україні все ще недостатньо розвинені системи переробки відходів, вторинного використання ресурсів та індустріальної симбіозності. Це свідчить про те, що декарбонізація в Україні наразі значною мірою орієнтована на енергетичний перехід, тоді як циркулярний компонент перебуває на етапі формування. Побудована динаміка НМДІ дозволила також сформулювати сценарії розвитку до 2030 року. Базовий сценарій передбачає поступове зростання індексу за рахунок продовження розвитку ВДЕ, цифрової економіки та інтеграції до європейського кліматичного простору.

Процес декарбонізації в Україні не можна розуміти як однорідну національну трансформацію, оскільки регіональні економічні структури суттєво визначають як інтенсивність викидів, так і доцільність стратегій пом'якшення наслідків. Промислові регіони східної та південно-східної України характеризуються високим рівнем викидів парникових газів через концентровану металургію, виробництво енергії на основі вугілля та важку обробку промисловість. На противагу цьому, центральні регіони демонструють змішану структуру, де сільське господарство, транспорт та помірна промислова діяльність сприяють викидам, тоді як західні регіони загалом демонструють нижчу вуглецеву інтенсивність та більший потенціал для розвитку відновлюваної енергетики, зокрема в біомасі, сонячній енергії та малих гідроенергетичних системах.

У контексті декарбонізації справедливий перехід включає кілька ключових вимірів як трансформація ринку праці, включаючи перепідготовку та перекваліфікацію працівників вугільної та важкої промисловості, регіональна економічна диверсифікація, спрямована на зменшення залежності від моногалузевих економік, механізми соціального захисту, що забезпечують

стабільність доходів під час структурних економічних зрушень, участь громад, що дозволяє місцевому населенню брати участь у процесах прийняття рішень щодо енергетичної та промислової трансформації.

Сценарії декарбонізації Східної України демонструють, що найбільш збалансованими за обсягом витрат і ефективності є заходи з підвищення енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Електрифікація промисловості має значний потенціал скорочення викидів, проте потребує суттєвих інвестицій у модернізацію інфраструктури. Центральні регіони України, включаючи Полтавську, Черкаську, Вінницьку, Кіровоградську та Київську області (за винятком столиці), характеризуються більш збалансованою економічною структурою з потужною сільськогосподарською базою та помірним промисловим розвитком. Викиди в цих регіонах пов'язані переважно із сільським господарством, транспортом, дрібномасштабним виробництвом та споживанням енергії в житловому секторі.

Центральні регіони України характеризуються значним нереалізованим потенціалом підвищення енергоефективності, особливо у житловому секторі. Висока частина будівель, що потребують термомодернізації, говорять про системні проблеми енергоспоживання, сформовані ще в попередні періоди. Північні регіони України відіграють важливу роль у національному балансі поглинання вуглецю завдяки значній частині лісових екосистем. Високий рівень лісового покриття забезпечує стабільний природний поглинач CO₂, що є ключовим елементом політики кліматичної нейтральності. Водночас наявність деградованих та частково занедбаних земель формує додатковий потенціал для відновлення екосистем і розширення вуглецевих поглиначів.

Пріоритетні напрямки діяльності: розвиток циркулярних можливостей через стратегічні партнерства дозволяє спільне інвестування та розподіл ризиків, одночасно отримуючи доступ до спеціалізованої експертизи; активна участь у розробці політики та створенні галузевих стандартів формує сприятливі рамки,

одночасно позиціонуючи організації для дотримання нормативних вимог та конкурентних переваг. крім того, організації повинні розглядати інновації у сфері рекультивациі шахт як частину своїх циркулярних стратегій, забезпечуючи сталий видобуток ресурсів, що відповідає принципам циркулярної економіки; програми культурної трансформації залучають співробітників та клієнтів до принципів циркулярної економіки, одночасно розвиваючи організаційні можливості для системного мислення та оптимізації життєвого циклу. Ці програми створюють стійкі конкурентні переваги завдяки вбудованим циркулярним компетенціям. Циркулярна економіка в декарбонізації являє собою трансформаційний підхід, який фундаментально переосмислює те, як суспільства управляють ресурсами, прагнучи досягти кліматичних цілей.

Результати досліджень відображені у працях [3, 4, 5, 6, 7]

ВИСНОВКИ

У рамках циркулярної економіки ефективність декарбонізації доцільно розглядати як багатовимірну категорію, що охоплює не лише скорочення викидів парникових газів, а й рівень ресурсоефективності, інноваційності, структурної модернізації та інтеграції низьковуглецевих технологій у виробничі процеси. Такий підхід дозволяє перейти від вузького трактування декарбонізації як екологічного процесу до розуміння її як комплексної моделі трансформації економічної системи.

З метою комплексного оцінювання ефективності декарбонізації в умовах циркулярної економіки запропоновано авторську інтегровану модель Індекс гібридної мобільності та декарбонізації «Hybrid Mobility and Decarbonization Index» чи HMDI, яка поєднує екологічні, економічні та структурні параметри трансформації. Порівняльний аналіз індексу гібридної мобільності та декарбонізації свідчить про суттєві відмінності у моделях низьковуглецевої трансформації між Європейським Союзом, азійськими економіками та Україною. Ці відмінності формуються під впливом різного рівня технологічного розвитку, структури енергетичних систем, інституційної спроможності, ступеня інтеграції циркулярної економіки та масштабів цифровізації.

Особливістю української моделі є те, що декарбонізація тісно поєднується з питаннями енергетичної безпеки, післявоєнної реконструкції та модернізації інфраструктури. На відміну від багатьох країн Азії, де головним драйвером декарбонізації виступає промислова конкурентоспроможність, або ЄС, де домінує кліматичне регулювання, в Україні основним стимулом низьковуглецевого переходу дедалі більше стає необхідність енергетичної автономізації та відбудови стійкої економіки.

Результати розрахунку свідчать про нерівномірність декарбонізаційної трансформації. Найбільш слабким компонентом моделі залишається рівень циркулярності економіки (CE_n), оскільки в Україні все ще недостатньо розвинені системи переробки відходів, вторинного використання ресурсів та індустріальної

симбіозності. Це свідчить про те, що декарбонізація в Україні наразі значною мірою орієнтована на енергетичний перехід, тоді як циркулярний компонент перебуває на етапі формування. Побудована динаміка НМДІ дозволила також сформулювати сценарії розвитку до 2030 року. Базовий сценарій передбачає поступове зростання індексу за рахунок продовження розвитку ВДЕ, цифрової економіки та інтеграції до європейського кліматичного простору.

Процес декарбонізації в Україні не можна розуміти як однорідну національну трансформацію, оскільки регіональні економічні структури суттєво визначають як інтенсивність викидів, так і доцільність стратегій пом'якшення наслідків. Промислові регіони східної та південно-східної України характеризуються високим рівнем викидів парникових газів через концентровану металургію, виробництво енергії на основі вугілля та важку обробку промисловість. На противагу цьому, центральні регіони демонструють змішану структуру, де сільське господарство, транспорт та помірна промислова діяльність сприяють викидам, тоді як західні регіони загалом демонструють нижчу вуглецеву інтенсивність та більший потенціал для розвитку відновлюваної енергетики, зокрема в біомасі, сонячній енергії та малих гідроенергетичних системах.

Окрім структурних економічних відмінностей, триваюча повномасштабна війна значно змінила енергетичний ландшафт України та прискорила певні аспекти декарбонізації. Руйнування централізованої енергетичної інфраструктури підвищило важливість децентралізованих та стійких енергетичних систем, включаючи маломасштабні сонячні установки, виробництво енергії з біомаси та локальні рішення для зберігання енергії. Ці зміни посилили роль регіональних органів влади та місцевих громад у забезпеченні енергетичної безпеки та впровадженні кліматично чистих технологій.

У контексті декарбонізації справедливий перехід включає кілька ключових вимірів як трансформація ринку праці, включаючи перепідготовку та перекваліфікацію працівників вугільної та важкої промисловості, регіональна

економічна диверсифікація, спрямована на зменшення залежності від моногалузевих економік, механізми соціального захисту, що забезпечують стабільність доходів під час структурних економічних зрушень, участь громад, що дозволяє місцевому населенню брати участь у процесах прийняття рішень щодо енергетичної та промислової трансформації.

Сценарії декарбонізації Східної України демонструють, що найбільш збалансованими за обсягом витрат і ефективності є заходи з підвищення енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Електрифікація промисловості має значний потенціал скорочення викидів, проте потребує суттєвих інвестицій у модернізацію інфраструктури. Воднева металургія забезпечує один із найвищих рівнів результату скорочення викидів, але її впровадження обмежене високою вартістю та технологічною складністю. Повна системна модернізація дозволяє досягти максимального ефекту декарбонізації, проте є капіталомісткою та потребує довгострокового стратегічного планування. Загалом ефективний перехід вимагає комбінування кількох сценаріїв.

Центральні регіони України, включаючи Полтавську, Черкаську, Вінницьку, Кіровоградську та Київську області (за винятком столиці), характеризуються більш збалансованою економічною структурою з потужною сільськогосподарською базою та помірним промисловим розвитком. Викиди в цих регіонах пов'язані переважно із сільським господарством, транспортом, дрібномасштабним виробництвом та споживанням енергії в житловому секторі.

Центральні регіони України характеризуються значним нереалізованим потенціалом підвищення енергоефективності, особливо у житловому секторі. Висока частина будівель, що потребують термомодернізації, говорять про системні проблеми енергоспоживання, сформовані ще в попередні періоди. Водночас модернізація будівель дозволяє досягти суттєвої економії енергії, що робить цей напрям одним із найбільш ефективних з точки зору витрат і результату. Поступове впровадження інтелектуальних систем обліку та оновлення теплопостачання

створює передумови для підвищення керованості енергоспоживання. Загалом сектор домогосподарств залишається ключовою сферою для реалізації політики енергоефективності.

Північні регіони України відіграють важливу роль у національному балансі поглинання вуглецю завдяки значній частині лісових екосистем. Високий рівень лісового покриття забезпечує стабільний природний поглинач CO₂, що є ключовим елементом політики кліматичної нейтральності. Водночас наявність деградованих та частково занедбаних земель формує додатковий потенціал для відновлення екосистем і розширення вуглецевих поглиначів. Високий рівень охоплення програмами лісовідновлення проти активної державної та регіональної політики у сфері сталого землекористування. У перспективі це дозволяє посилити роль регіону як природного «вуглецевого буфера» в національній кліматичній стратегії.

Пріоритетні напрямки діяльності: розвиток циркулярних можливостей через стратегічні партнерства дозволяє спільне інвестування та розподіл ризиків, одночасно отримуючи доступ до спеціалізованої експертизи; активна участь у розробці політики та створенні галузевих стандартів формує сприятливі рамки, одночасно позиціонуючи організації для дотримання нормативних вимог та конкурентних переваг. Крім того, організації повинні розглядати інновації у сфері рекультивації шахт як частину своїх циркулярних стратегій, забезпечуючи сталий видобуток ресурсів, що відповідає принципам циркулярної економіки; програми культурної трансформації залучають співробітників та клієнтів до принципів циркулярної економіки, одночасно розвиваючи організаційні можливості для системного мислення та оптимізації життєвого циклу. Ці програми створюють стійкі конкурентні переваги завдяки вбудованим циркулярним компетенціям. Циркулярна економіка в декарбонізації являє собою трансформаційний підхід, який фундаментально переосмислює те, як суспільства управляють ресурсами, прагнучи досягти кліматичних цілей.

Список використаних джерел

1. Пирожков, С. І., Рязанцева, В. В., Моторин, Р. М. та ін. (2020). Статистика. Київський національний торговельно-економічний університет. <http://doi.org/10.31617/p.knute.2020-164>
2. Шевченко, Т. І., Шуптар-Пориваєва, Н. Й., & Губанова, О. Р. та ін. (2022). Циркулярна економіка: навчальний посібник. та ін. Суми : Університетська книга, 2022. 220 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/369372328_Cirkularna_ekonomika.
3. Драпак Т.І., Баб'яр В.П. Циркулярна економіка: можливості та бар'єри. Збірник наукових праць «Цифрова економіка та економічна безпека», № 1(10), 2024 рік. С. 67-73. URL: <https://doi.org/10.32782/dees.10->
4. Драпак Т.І., Корнієнко Д. Б., Баб'яр В.П. Трансформація економічних, фінансових та продуктивних систем пришвидшує перехід до сталого розвитку Економічний науково-практичний журнал Сталій розвиток економіки, № 4 (51), 2024 С. 199-205. URL: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-51-29>
5. Баб'яр В.П., Зварич І. Я., Ванкевич І. С. Фінансові виклики та загрози логістики циркулярної економіки. Науковий журнал Західноукраїнського національного університету «Світ фінансів». Випуск 1, 2024 рік. С. 111 – 130.
URL: <http://sf.wunu.edu.ua/index.php/sf/article/view/1676/1687m>
6. Баб'яр В.П., Кельнер О., Бочаров В., Тимофійчук Ю. Сучасні аспекти корпоративної соціальної відповідальності та їх вплив на глобальний економічний розвиток. Інклюзивна економіка, № 4 (06), 2024 С. 5 – 11.
URL: https://doi.org/10.32782/inclusive_economics.6-1
7. Баб'яр В.П., Зварич І. Я., Гладкий Я. Екологічне відновлення України шляхом публічної дипломатії. Інвестиції: практика та досвід " № 5, березень 2026 р. С.104-114. URL: 10.32702/2306-6814.2026.5.104

8. Osaulenko, O., Reznikova N., Zvarych, I., Brodovska, O., Krysovaty A., Krysovaty I. Complementary approach to the analysis of countries' participation in global production networks. Journal: Statistical Journal of the IAOS, vol. 39, no. 3, pp. 649-658, 2023. URL: <https://doi.org/10.3233/SJI-220094>
9. Зварич І.Я. Стратегічні пріоритети реалізації дорожньої карти циркулярної економіки в Україні. № 4(65) (2020), СВІТ ФІНАНСІВ, С. 23 – 39. URL: <http://sf.wunu.edu.ua/index.php/sf/article/view/1435>
10. Зварич І.Я. Детермінанти формування глобальної інклюзивної циркулярної економіки. Бізнес інформ. 2021. Номер 1. С. 40-48. URL: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2021-1-40-48>
11. Reznikova N., Zvarych R., Zvarych I., Shnyrkov O. Global circular e-chain in overcoming the global waste. Procedia Environmental Science, Engineering and Management. Vol. 6, Issue 4. 2019. P. 641-647. URL: http://www.procedia.esem.eu/pdf/issues/2019/no4/12_Reznikova_19.pdf
12. Zvarych I. Circular Economy as an Anti-Crisis Method under COVID-19. International economic and political relationships under COVID-19: experience of China and Ukraine : collection of international scientific works / National Academy of Sciences of Ukraine, State Institution "Institute for Economics and Forecasting of the National Academy of Sciences of Ukraine". – Kyiv, 2020. – 97 p. – Mode of Access : <http://ief.org.ua/docs/scc/16.pdf>
13. Zvarych I., Ivashchuk I. Inclusive growth's vectors in functioning of the global inclusive circular economy. Perspectives – Journal on economic issues. 2019. Vol.5.Issue 1. P. 4 – 17. URL: http://perspectives.vse.cz/archive/2019/1/perspectives_01_2019_01.pdf
14. Максимова, І., Куриляк, В., Мієтуле, І., Арбідане, І., & Куриляк, М. (2024). Цифрово орієнтована модель кліматично нейтральної економіки в контексті глобальної фінансової спроможності. Financial and Credit

- Activity Problems of Theory and Practice, 3(56), 334–349. URL: <https://doi.org/10.55643/fcaptp.3.56.2024.4399>
15. Максимова, І., & Куриляк, В. (2024). Digitalization and decarbonization: aspects of synergy in the EU industries. *Економіка та суспільство*, (67). URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-157>
16. Maksymova, V. Kuryliak, M. Kuryliak, A. Zinchyuk, A. Shabliy. Integration potential in SMES in the Eastern Partnership Countries within the context of the EU Green Deal. *Journal of European Economy*. – 2025. – Vol. 24, № 4.- P. 720-743. URL: <https://doi.org/10.35774/jee2025.04.720>
17. Borysiak O., Brych V., Manzhula V., Lechowicz T., Dluhopolska T., Putsenteilo P. Synergy of Energy-Efficient and Low-Carbon Management of the Logistics Chains Within Developing Distributed Generation of Electric Power: The EU Evidence for Ukraine. *Energies*. 2025. 18(20), 5512. URL: <https://doi.org/10.3390/en18205512>
18. Пуцентейло П.Р., Брич В.Я., Бруханський Р.Ф., Домбровська Н.Р. Розвиток відновлюваних джерел енергії: економічні аспекти виробництва та статистичний аналіз глобальних тенденцій. *Інноваційна економіка*. 2024. № 2 (98). С. 218-230. URL: <https://doi.org/10.37332/>
19. Пуцентейло П.Р. Концепція Smart Grid: технологічні, організаційні та економічні аспекти розвитку енергетичної сфери. *Інноваційна економіка*. 2023. № 1 (93). С. 137-150. URL: <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2023.1.19>
20. Borysiak O., Brych V., Manzhula V., Lechowicz T., Dluhopolska T., Putsenteilo P. Synergy of Energy-Efficient and Low-Carbon Management of the Logistics Chains Within Developing Distributed Generation of Electric Power: The EU Evidence for Ukraine. *Energies*. 2025. 18(20), 5512. URL: <https://doi.org/10.3390/en18205512>

21. Borysiak O., Brych V., Dlyhopolskyi O., Popovych P., Bondarchuk M. Low-carbon management in selecting resources for energy production of enterprises. *Polityka Energetyczna*. 2024. Vol. 27(4). P. 81-98. URL: <https://doi.org/10.3390/en17030575>
22. Яценко О. М. Розвиток інноваційного бізнесу та міжнародної торгівлі воднем: інституціональне забезпечення енергетичного переходу для сталого пост-вуглецевого майбутнього. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2025. Том 10. № 1. С. 92 – 103. URL: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-1-16>
23. Яценко, О., Мордань, В., & Яценко, О. (2025). ПОТЕНЦІАЛ ВОДНЮ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ГЛОБАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ: ІННОВАЦІЇ ТА ДИНАМІКА ТОРГІВЛІ. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 338(1), 94-100. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-338-13>
24. Яценко, О., Панченко, В., & Іващенко, О. (2024). Кліматичні обмеження економічного зростання як виклики фінансування міжнародних інвестиційних проєктів у сфері циркулярної економіки. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 332(4), 82-89. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-332-11>
25. Орехова Т., Федорчук В. ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ЦИФРОВІ ТРАНСФОРМАЦІЇ У КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛЬНОГО НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОГО РОЗВИТКУ. - Регіональні аспекти розвитку продуктивних сил України. 2024. Вип. 29. – стор. 4-13. URL: <https://rarrpsu.wunu.edu.ua/index.php/rarrpsu/article/view/520/571>
26. Roleders, V., Oriekhova, T., Sysoieva, I., Mazur, V., & Derun, T. Global experience of applying the circular economy model in light industry. *Management Theory and Studies for Rural Business and Infrastructure*

- Development, 45(1), (2023). 46–55. URL: <https://doi.org/10.15544/mts.2023.06>
27. Roleders, V., Oriekhova, T., & Sysoieva, I. (2022). TRENDS IN A GLOBAL CIRCULAR ECONOMY. *Management Theory and Studies for Rural Business and Infrastructure Development*, 44(2), 176–184. URL: <https://doi.org/10.15544/mts.2022.18>
28. Zhu, Y. & Lu, S. D. Economy and carbon neutrality: exploring the pathways and implications for China's sustainable development. *J. Knowl. Econ.* **1–18** <https://doi.org/10.1007/S13132-024-01931-Y/TABLES/5> (2024).
29. Aydin, M. & Bozatli, O. The impacts of the refugee population, renewable energy consumption, carbon emissions, and economic growth on health expenditure in Turkey: new evidence from Fourier-based analyses. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25181-8> (2023).
30. Amin, A. et al. The influence of renewable and non-renewable energy on carbon emissions in Pakistan: Evidence from stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology model. *Front. Environ. Sci.* **11**, 1182055 (2023).
31. Shah, W. U. H. et al. Role of renewable, non-renewable energy consumption and carbon emission in energy efficiency and productivity change: evidence from G20 economies. *Geosci. Front.* <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101631> (2023).
32. Di, K. et al. Regional unevenness and synergy of carbon emission reduction in China's green low-carbon circular economy. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138436> (2023).
33. Hu, F. et al. Structural evolution and policy orientation of China's rare Earth innovation network: A social network analysis based on collaborative patents. *Pol. J. Environ. Stud.* **33**, 1767–1779 (2024).

34. Hu, F., Wei, S., Qiu, L., Hu, H. & Zhou, H. Innovative association network of new energy vehicle charging stations in China: Structural evolution and policy implications. *Heliyon* **10**, e24764 (2024).
35. Hu, F. et al. Spatial network and driving factors of low-carbon patent applications in China from a public health perspective. *Front. Public Health*. **11**, 1121860 (2023).
36. Vázquez-Torres, C. E., Bienvenido-Huertas, D., Beizaee, A., Bassam, A. & Torres, M. J. Thermal performance of historic buildings in Mexico: an analysis of passive systems under the influence of climate change. *Energy. Sustain. Dev.* <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.002> (2023).
37. Ma, Y., Li, Y. P. & Huang, G. H. Planning China's non-deterministic energy system (2021–2060) to achieve carbon neutrality. *Appl. Energy*. **334**, 120673 (2023).
38. Solecki, W., Roberts, D. & Seto, K. C. Strategies to improve the impact of the IPCC Special Report on Climate Change and Cities. *Nature Climate Change* **2024 14:7** 14, 685–691 (2024).
39. Ma, Z., Wu, F. & Smart City Digitalization and CO₂ emissions: evidence from 353 cities in China. *Sustain. (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su15010225> (2023).
40. Zhang, Y., Han, X., Wei, T., Zhao, X. & Zhang, Y. Techno-environmental-economical performance of allocating multiple energy storage resources for multi-scale and multi-type urban forms towards low carbon district. *Sustain. Cities Soc.* **99**, 104974 (2023).
41. Chen, Y., Li, Q., Liu, J. Y. & Innovating Sustainability VQA-Based AI for Carbon Neutrality Challenges. <https://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/JOEUC.337606> 36, 1–22 (1AD).

42. Kurniawan, T. A. et al. Challenges and opportunities for Biochar to promote circular economy and carbon neutrality. *J. Environ. Manage.* **332**, 117429 (2023).
43. De La Peña, L., Guo, R., Cao, X., Ni, X. & Zhang, W. Accelerating the energy transition to achieve carbon neutrality. *Resour. Conserv. Recycl.* **177**, 105957 (2022).
44. Hieu, N. T., Le Thanh, H. & Minh Anh, B. T. Scrutinizing time-varying interlinkages between digitalization, green technologies, CO₂ emission, and energy productivity in Vietnam. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137581> (2023).
45. Luo, J., Zhuo, W. & Xu, B. The bigger, the better? Optimal NGO size of human resources and governance quality of entrepreneurship in circular economy. *Manag. Decis.* **62**, 2472–2509 (2024).
46. Xu, A., Wang, W. & Zhu, Y. Does smart City pilot policy reduce CO₂ emissions from industrial firms? Insights from China. *J. Innov. Knowl.* **8**, 100367 (2023).
47. Annual, R. (2024). <https://www.worldbank.org/en/about/annual-report#anchor-annual>
48. Gu, F. & Liu, X. Exploring the impact of natural resources and energy transition on CO₂ intensity in China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28286-2> (2023).
49. Kandpal, V., Jaswal, A., Santibanez Gonzalez, E. D. R. & Agarwal, N. The Economics of Sustainable Energy Transition and the Circular Economy. 53–87 (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-52943-6_2
50. Xu, X., Wang, C. & Zhou, P. GVRP considered oil-gas recovery in refined oil distribution: From an environmental perspective. *Int. J. Prod. Econ.* **235**, 108078 (2021).

51. China. exports to countries involved in the BRI 2023 | Statista. <https://www.statista.com/statistics/1269017/china-export-value-with-the-belt-and-road-initiative-countries/>
52. Decoding China's Import-Export Trends 2024-25. <https://www.china-briefing.com/news/china-import-export-trends-2024-25-the-first-10-months/>
53. Rahman, M. M. & Alam, K. CO2 emissions in Asia–Pacific region: Do energy use, economic growth, financial development, and international trade have detrimental effects?? *Sustain. (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su14095420> (2022).
54. IEA – International Energy Agency. <https://www.iea.org/>
55. Stojanović, Đ., Ivetić, J. & Veličković, M. Assessment of international trade-related transport CO2 emissions—a logistics responsibility perspective. *Sustain. (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su13031138> (2021).
56. Lu, L., Liu, P., Yu, J. & Shi, X. Digital inclusive finance and energy transition towards carbon neutrality: evidence from Chinese firms. *Energy Econ.* **127**, 107059 (2023).
57. Jesih, A. R., Šimić, G., Konatar, L., Brljak, Z. & Šprajc, P. Energy efficiency as a driver of the circular economy and carbon neutrality in selected countries of Southern Europe: a soft computing approach. <https://doi.org/10.1186/s13705-024-00456-1>
58. World, T. & Council, E. World Energy Issues Monitor. *The World in Figures* (2022). (2022).
59. Yu, Y. U., Liu, Z., Ecofeminism, Change, C. & EFCC). and (3(2) 81–84 Ecofeminism and Climate Change (EFCC) ARTICLE CITATION CONTRIBUTION INDICATOR: APPLICATION IN ENERGY AND ENVIRONMENT. (2022) (2022). <https://doi.org/10.26480/efcc.02.2022.81.84>

60. Zhao, S. et al. Has China's low-carbon strategy pushed forward the digital transformation of manufacturing enterprises? Evidence from the low-carbon City pilot policy. *Environ. Impact Assess. Rev.* **102**, 107184 (2023).
61. Huang, F. & Ren, Y. Harnessing the green frontier: the impact of green finance reform and digitalization on corporate green innovation. *Financ Res. Lett.* **66**, 105554 (2024).
62. Razzaq, A., Sharif, A., Ozturk, I. & Afshan, S. Dynamic and threshold effects of energy transition and environmental governance on green growth in COP26 framework. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113296> (2023).
63. Lu, D. & Wang, Z. Towards green economic recovery: how to improve green total factor productivity. *Economic Change Restruct.* <https://doi.org/10.1007/s10644-023-09515-7> (2023).
64. Ferreira, J. J., Lopes, J. M., Gomes, S. & Dias, C. Diverging or converging to a green world? Impact of green growth measures on countries' economic performance. *Environ. Dev. Sustain.* <https://doi.org/10.1007/s10668-023-02991-x> (2023).
65. Li, Y. & Fang, Y. Effect of digital finance on inclusive green growth through technological innovation. *Innov. Dev.* <https://doi.org/10.1080/2157930X.2023.2268914> (2023).
66. Ben Lahouel, B., Taleb, L., Managi, S. & Abaoub, N. Inclusive green growth in OECD countries: What are the impacts of stringent environmental and employment regulations? *Environ. Econ. Policy Stud.* <https://doi.org/10.1007/s10018-023-00362-4> (2023).
67. Dong, K., Zhao, J. & Taghizadeh-Hesary, F. Toward China's green growth through boosting energy transition: The role of energy efficiency. *Energy Effic.* <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10123-7> (2023).

68. Mongo, M., Laforest, V., Belaïd, F. & Tanguy, A. Assessment of the impact of the circular economy on CO₂ emissions in Europe. *J. Innov. Econ. Manage.* <https://doi.org/10.3917/jie.pr1.0107> (2022).
69. Tiwari, S., Si Mohammed, K., Mentel, G., Majewski, S. & Shahzadi, I. Role of circular economy, energy transition, environmental policy stringency, and supply chain pressure on CO₂ emissions in emerging economies. *Geosci. Front.* <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101682> (2023).
70. Artificial intelligence for reducing the carbon emissions of 5G networks in China. *Nature Sustainability* 2023 6:12 6, 1522–1523. (2023).
71. Hailemariam, A. & Erdiaw-Kwasie, M. O. Towards a circular economy: implications for emission reduction and environmental sustainability. *Bus. Strategy Environ.* <https://doi.org/10.1002/bse.3229> (2023).
72. Tcvetkov, P., Cherepovitsyn, A. & Fedoseev, S. The changing role of CO₂ in the transition to a circular economy: Review of carbon sequestration projects. *Sustainability* (Switzerland) Preprint at (2019). <https://doi.org/10.3390/su11205834>
73. Zhao, S., Zhang, L., Peng, L., Zhou, H. & Hu, F. Enterprise pollution reduction through digital transformation? Evidence from Chinese manufacturing enterprises. *Technol. Soc.* **77**, 102520 (2024).
74. Mohamed, A. M. O., Mohamed, D., Fayad, A. & Al Nahyan, M. T. Enhancing decision making and decarbonation in environmental management: A review on the role of digital technologies. *Sustain.*
75. Li, T. et al. Carbon emissions of 5G mobile networks in China. *Nature Sustainability* 2023 6:12 6, 1620–1631 (2023).
76. Decarbonisation and Digitization of the Energy System. 1099, (2024).
77. Di Vaio, A., Ali, T. & Balsalobre-Lorente, D. Decarbonization practices and disclosure in the nexus of waste-food-energy using digital technologies in the

- framework of a hydrogen economy. *Accelerating Transition Hydrogen Econ.* 77–97. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14039-6.00005-1> (2025).
78. Heymann, F., Milojevic, T., Covatariu, A. & Verma, P. Digitalization in decarbonizing electricity systems – Phenomena, regional aspects, stakeholders, use cases, challenges and policy options. *Energy* <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125521> (2023).
79. Agan, B. & Balcilar, M. Unraveling the green growth matrix: exploring the impact of green technology, climate change adaptation, and macroeconomic factors on sustainable development. *Sustain. (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su15118530> (2023).
80. Kurniawan, T. A. et al. Unlocking synergies between waste management and climate change mitigation to accelerate decarbonization through circular-economy digitalization in Indonesia. *Sustain. Prod. Consum.* **46**, 522–542 (2024).
81. Wu, Q. & Li, S. Decarbonization by digits: how data factors drive nonlinear sustainable dynamics in manufacturing. *Appl. Energy.* **374**, 123967 (2024).
82. Ohueri, C. C., Masrom, M. A. N. & Seghier, T. E. Digital twin for decarbonizing operating buildings: A systematic review and implementation framework development. *Energy Build.* **320**, 114567 (2024).
83. Azizi, E., Hua, W., Stephen, B., Wallom, D. C. H. & McCulloch, M. Digitalization opportunities to enable local power system transition to net-zero. *Energy. Sustain. Dev.* **84**, 101596 (2025).
84. Murshed, M. Can renewable energy transition drive green growth? The role of good governance in promoting carbon emission-adjusted economic growth in next eleven countries. *Innov. Green. Dev.* <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100123> (2024).

85. Sun, X. & Waqas, M. Assessing the influence of tourism development, via renewable energy and green finance in achieving high-quality economic development. *Heliyon* **10**, e33970 (2024).
86. Hou, K. & Waqas, M. Assess the economic and environmental impacts of the energy transition in selected Asian economies. *Energies* **2024**, **17**, 5103 (2024).
87. You, Z., Li, L. & Waqas, M. How do information and communication technology, human capital and renewable energy affect CO₂ emission; new insights from BRI countries. *Heliyon* **10**, e26481 (2024).
88. Zhou, L., Ke, Z. & Waqas, M. Beyond the arena: How sports economics is advancing China's sustainable development goals. *Heliyon* **9**, e18074 (2023).
89. Gan, H., Zhu, D. & Waqas, M. How to decouple tourism growth from carbon emission? A panel data from China and tourist nations. *Heliyon* **10**, e35030 (2024).
90. Ameer, W., Ali, M. S., Farooq, F., Ayub, B. & Waqas, M. Renewable energy electricity, environmental taxes, and sustainable development: empirical evidence from E7 economies. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **31**, 46178–46193 (2024).
91. Mentel, G. et al. R&D human capital, renewable energy and CO₂ emissions: evidence from 26 countries. *Energies (Basel)*. <https://doi.org/10.3390/en15239205> (2022).
92. Zhao, D. et al. Modeling the nexus between geopolitical risk, oil price volatility and renewable energy investment; evidence from Chinese listed firms. *Renew. Energy*. **225**, 120309 (2024).
93. Meng, Y., Wu, H., Wang, Y. & Duan, Y. International trade diversification, green innovation, and consumption-based carbon emissions: the role of renewable energy for sustainable development in BRICST countries. *Renew. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.045> (2022).

94. Zhu, R. et al. Role of resources rent, research and development, and information and communication technologies on CO₂ emissions in BRICS economies. *Resour. Policy*. **93**, 105072 (2024).
95. Udeagha, M. C., Ngepah, N. & Dynamic, A. R. D. L. Simulations effects of fiscal decentralization, green technological innovation, trade openness, and institutional quality on environmental sustainability: evidence from South Africa. *Sustain. (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su141610268> (2022).
96. Nasir, M. H. et al. Energy security and energy poverty in emerging economies: A step towards sustainable energy efficiency. *Front. Energy Res.* **10**, 834614 (2022).
97. Rahman, M. M., Saidi, K. & Mbarek, M. Ben. Economic growth in South Asia: the role of CO₂ emissions, population density and trade openness. *Heliyon* **6**, e03903 (2020).
98. Yang, S. et al. Green innovation at the crossroads of financial development, resource depletion, and urbanization: paving the way to a sustainable future from the perspective of an MM-QR
99. Li, M. et al. How does energy efficiency mitigate carbon emissions without reducing economic growth in post COVID-19 era. *Front. Energy Res.* **10**, 832189 (2022).
100. Muganyi, T., Yan, L. & Sun, H. ping. Green finance, fintech and environmental protection: evidence from China. *Environ. Sci. Ecotechnology*. **7**, 100107 (2021).
101. Kumar, S., Chatterjee, U. & Raj, A. D. Theoretical framework and approaches of susceptibility and sustainability: issues and drivers. *Water Land. For. Susceptibility Sustainability: Geospatial Approaches Model*. 3–25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91880-0.00027-1> (2022).
102. Adebayo, T. S. Trade-off between environmental sustainability and economic growth through coal consumption and natural resources exploitation

- in China: new policy insights from wavelet local multiple correlation. *Geol. J.* <https://doi.org/10.1002/gj.4664> (2023).
103. Sibt-E-Ali, M., Xia, X., Yi, Vasa, W., Xia, X. & L. & Quantifying the role of digitalization, financial technology, governance and SDG13 in achieving environment conservation in the perspective of emerging economies. *Environ. Dev. Sustain.* **2025**, 1–23. <https://doi.org/10.1007/S10668-024-05940-4> (2025).
104. Chen, Z. & Xu, W. The role of the digital economy in enhancing green innovation: evidence from Chinese A-share listed enterprises. *Financ Res. Lett.* **71**, 106381 (2025).
105. Blomquist, J. & Westerlund, J. Testing slope homogeneity in large panels with serial correlation. *Econ. Lett.* <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2013.09.012> (2013).
106. Pesaran, M. H. General diagnostic tests for cross-sectional dependence in panels. *Empir. Econ.* **60**, 13–50 (2021).
107. Pesaran, M. H. A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *J. Appl. Econom.* **22**, 265–312 (2007).
108. Westerlund, J. Testing for error correction in panel data**. *Oxf. Bull. Econ. Stat.* **69**, 709–748 (2007).
109. Lisha, L. et al. Natural resources, green innovation, fintech, and sustainability: A fresh insight from BRICS. *Resour. Policy.* <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103119> (2023).
110. Pesaran, M. H. Testing weak Cross-Sectional dependence in large panels. *Econom Rev.* **34**, 1089–1117 (2015).
111. Juodis, A. & Reese, S. The incidental parameters problem in testing for remaining Cross-Section correlation. *J. Bus. Economic Stat.* **40**, 1191–1203 (2022).

112. Pesaran, M. H. & Xie, Y. How to detect network dependence in latent factor models?? A Bias-Corrected CD test. *SSRN Electron. J.* <https://doi.org/10.2139/ssrn.4198155> (2021).
113. Ntom Udemba, E., Khan, N. U. & Raza Shah, S. A. Demographic change effect on ecological footprint: A tripartite study of urbanization, aging population, and environmental mitigation technology. *J. Clean. Prod.* **437**, 140406 (2024).
114. Xing, L., Udemba, E. N., Tosun, M., Abdallah, I. & Boukhris, I. Sustainable development policies of renewable energy and technological innovation toward climate and sustainable development goals. *Sustain. Dev.* **31**, 1178–1192 (2023).
115. Liu, X. et al. Nexus between resource policy, renewable energy policy and export diversification: asymmetric study of environment quality towards sustainable development. *Resour. Policy.* **88**, 104402 (2024).
116. Udemba, E. N., Shah, S. A. R., Philip, L. D. & Zhao, G. The mediating role of green energy and environmental policies in sustainable development for BRICS economies: A tripartite impact of entrepreneurial activities, urban development and economic growth on ecological footprint. *Sustain. Dev.* **32**, 4649–4670 (2024).
117. Mirletz, H., Ovaitt, S., Sridhar, S. & Barnes, T. M. Circular economy priorities for photovoltaics in the energy transition. *PLoS One.* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274351> (2022).
118. Udemba, E., Philip, L. D. & Emir, F. Performance and sustainability of environment under entrepreneurial activities, urbanization and renewable energy policies: A dual study of Malaysian climate goal. *SSRN Electron. J.* <https://doi.org/10.2139/SSRN.3924313> (2021).
119. Del Borghi, A. et al. Impact of circular measures to reduce urban CO₂ emissions: an analysis of four case studies through a production- and

- consumption-based emission accounting method. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134932> (2022).
120. Zhong, S., Chen, J., Ur, Z. & Faiz, R. Quantifying digital economy and green initiatives for carbon neutrality targets: A Kilian bias adjusted bootstrap model evaluation of China economy. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31445-0> (2024).
121. Zhang, J., Lyu, Y., Li, Y. & Geng, Y. Digital economy: An innovation driving factor for low-carbon development. *Environ. Impact Assess. Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106821> (2022).
122. Issatayeva, F. M. et al. Fuel and energy complex of Kazakhstan: Geological and economic assessment of enterprises in the context of digital transformation. *Energies (Basel)*. <https://doi.org/10.3390/en16166002> (2023).
123. Chen, Y., Chen, Y., Zhang, L. & Li, Z. Revealing the role of renewable energy consumption and digitalization in energy-related greenhouse gas emissions—Evidence from the G7. *Front. Energy Res.* <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1197030> (2023).
124. Hu, R., Liu, B. & Sohail, S. Green growth path dependence momentum under the Prism of COP26: the role of financial deepening, ICT development, and export diversification. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32277-2> (2024).
125. Li, K., Tan, X., Yan, Y., Jiang, D. & Qi, S. Directing energy transition toward decarbonization: The China story. *Energy* <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124934> (2022).
126. Fernández-Ríos, A. et al. Environmental sustainability of alternative marine propulsion technologies powered by hydrogen - a life cycle assessment approach. *Sci. Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153189> (2022).

127. Sani, S. A. et al. Energy transition pathways for deep decarbonization of the greater Montreal region: an energy optimization framework. *Energies (Basel)*. <https://doi.org/10.3390/en15103760> (2022).
128. Li, Y. & Zhang, X. Recycling scheme of carbon pricing for inclusive decarbonization and energy transition: A recursive computable general equilibrium analysis in China. *Renew. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119130> (2023).
129. Siddique, M. B., Nielsen, P. S., Rosendal, M. B., Jensen, I. G. & Keles, D. Impacts of earlier natural gas phase-out & heat-saving policies on district heating and the energy system. *Energy Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113441> (2023).
130. Trollip, H., McCall, B. & Bataille, C. How green primary iron production in South Africa could help global decarbonization. *Clim. Policy*. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.2024123> (2022).
131. Addai, K., Serener, B. & Kirikkaleli, D. Complementarities in the effect of economic globalization and decarbonization technologies on carbon neutrality. Evidence from Germany using Fourier-based approaches. *World Dev. Sustain.* <https://doi.org/10.1016/j.wds.2023.100050> (2023).
132. Emenekwe, C. C. et al. Macroeconomics of decarbonization strategies of selected global south countries: A systematic review. *Frontiers in Environmental Science Preprint* at (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.938017>
133. You, C., Khattak, S. I. & Ahmad, M. Do international collaborations in environmental-related technology development in the U.S. Pay off in combating carbon dioxide emissions? Role of domestic environmental innovation, renewable energy consumption, and trade openness. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17146-6> (2022).

134. Liu, M. Can the transformation of trade patterns achieve carbon reduction? Empirical evidence from a panel of 201 Chinese cities during the period 2000–2016. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27801-9> (2023).
135. World Bank. China Country Climate and Development Report [Електронний ресурс]. – Washington, DC: World Bank, 2022. – Режим доступу: <https://www.worldbank.org/en/country/china/publication/china-country-climate-and-development-report>
136. Asian Development Bank. Southeast Asia Energy Outlook 2022 [Електронний ресурс]. – Manila: ADB, 2022. – Режим доступу: <https://www.adb.org/publications/southeast-asia-energy-outlook-2022>
137. Інституційні механізми Європейської зеленої угоди у відновленні України, 2025, с. 80–85.
138. Іонін Ю., Додух В., Проблеми декарбонізації в нафтогазовому секторі України, 2025, с. 2–4.
139. ОЕСР, Огляд інвестиційної політики в енергетиці України, 2021, с. 50–55.
140. Вінклер К. та ін., Потенціал дахових фотоелектричних систем в Україні, 2024, с. 45–52.
141. Рейтер, Електрифікація та енергетична стійкість в Україні, 2026.
142. Стрілковський В., Розвиток зеленого водню в Україні, 2025, с. 10–14.
143. МЕА, Стимування попиту на енергію та інноваційні бар'єри в Україні, 2024.

ДОДАТКИ

Додаток А

Розподіл років досягнення цілі нульових викидів

Розподіл років досягнення цілі нульових викидів у групі: компанія

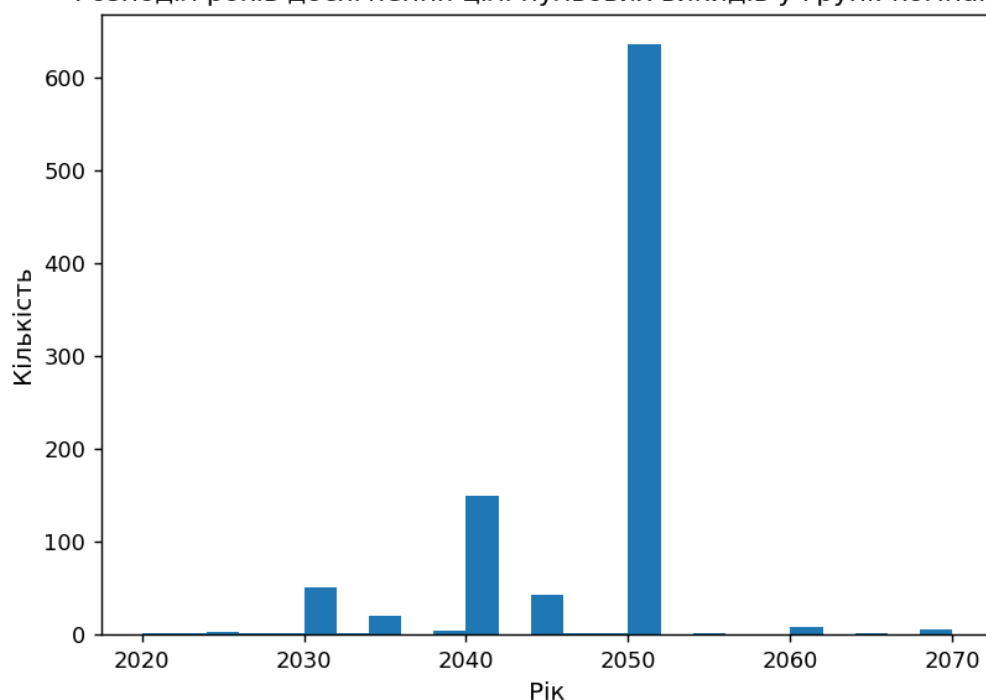


Рис. А1. Розподіл років досягнення цілі нульових викидів у групі: компанія

Розподіл років досягнення цілі нульових викидів у групі: країна

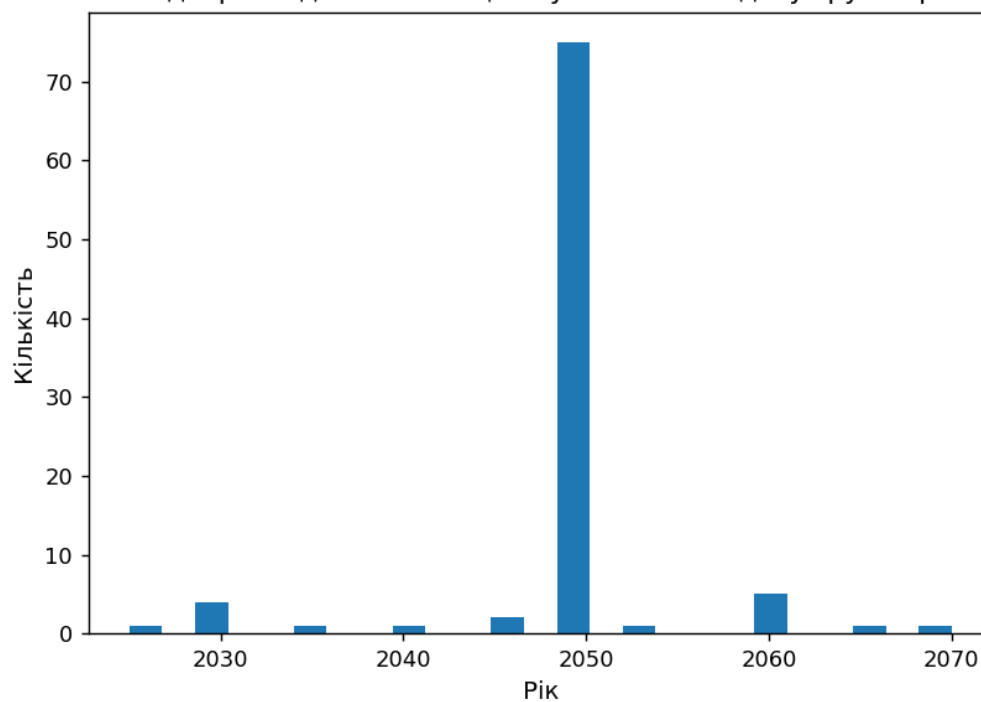


Рис. А2. Розподіл років досягнення цілі нульових викидів у групі: країна



Рис. А3. Розподіл років досягнення цілі нульових викидів у групі: місто



Рис. А4. Розподіл років досягнення цілі нульових викидів у групі: регіони

Додаток Б

Розподіл довгострокових кліматичних цілей

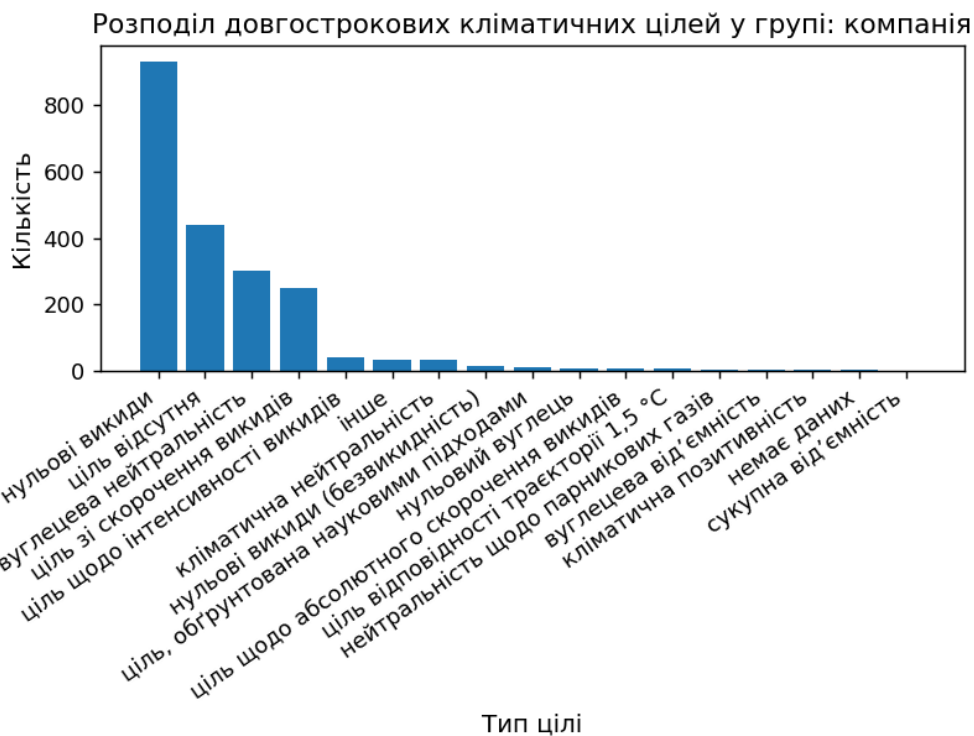


Рис. Б1. Розподіл довгострокових кліматичних цілей у групі: компанія

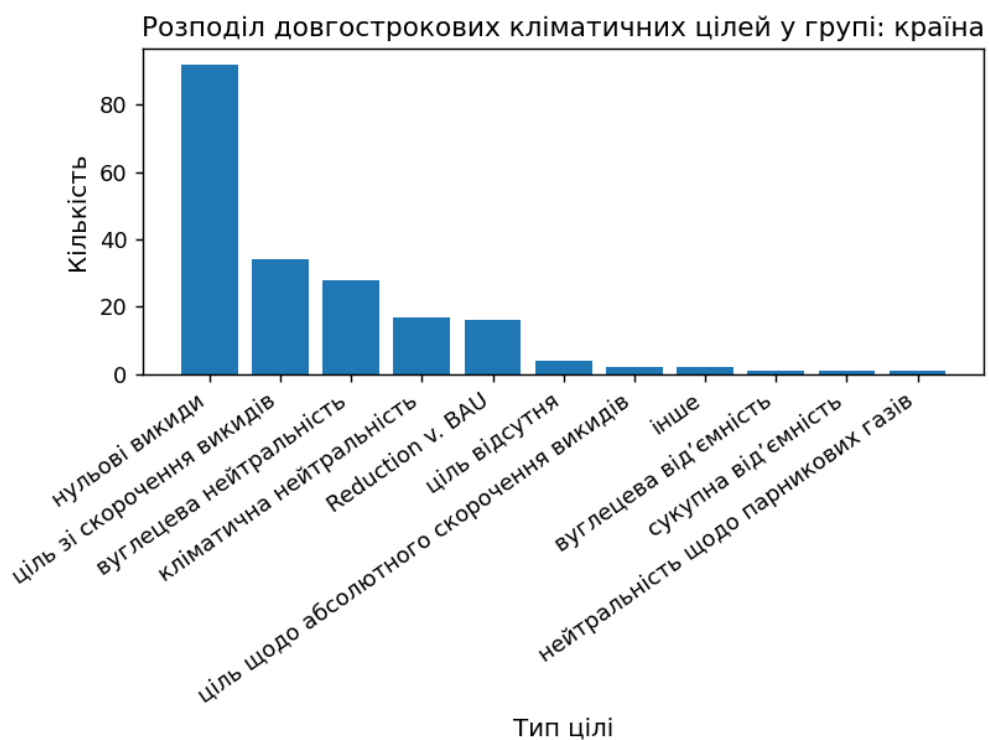


Рис. Б2. Розподіл довгострокових кліматичних цілей у групі: країна

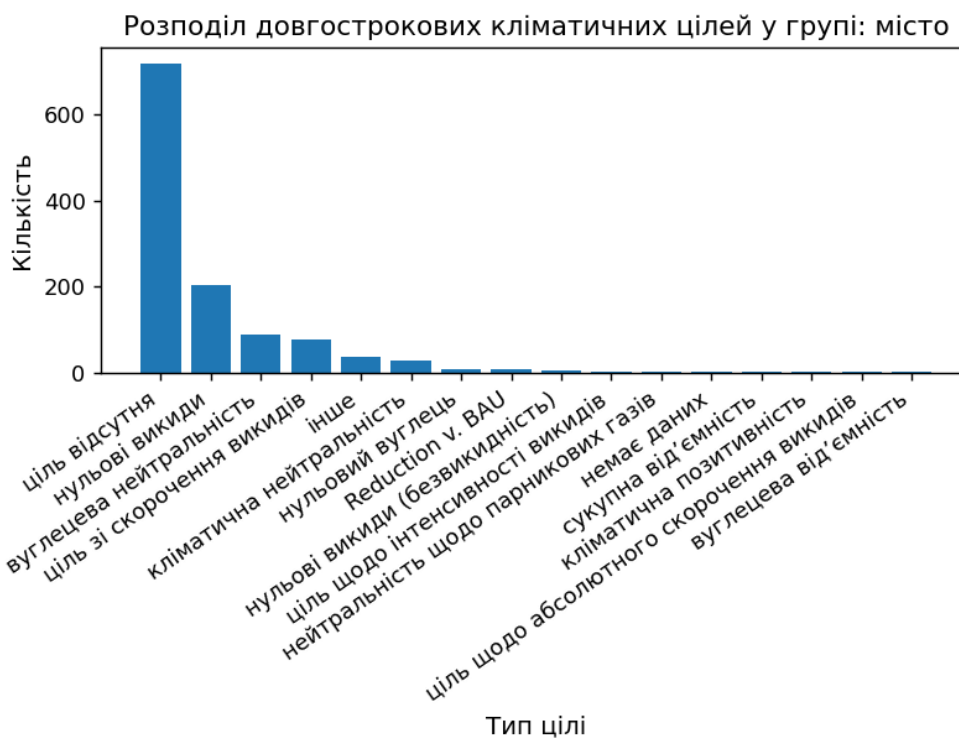


Рис. Б3. Розподіл довгострокових кліматичних цілей у групі: місто

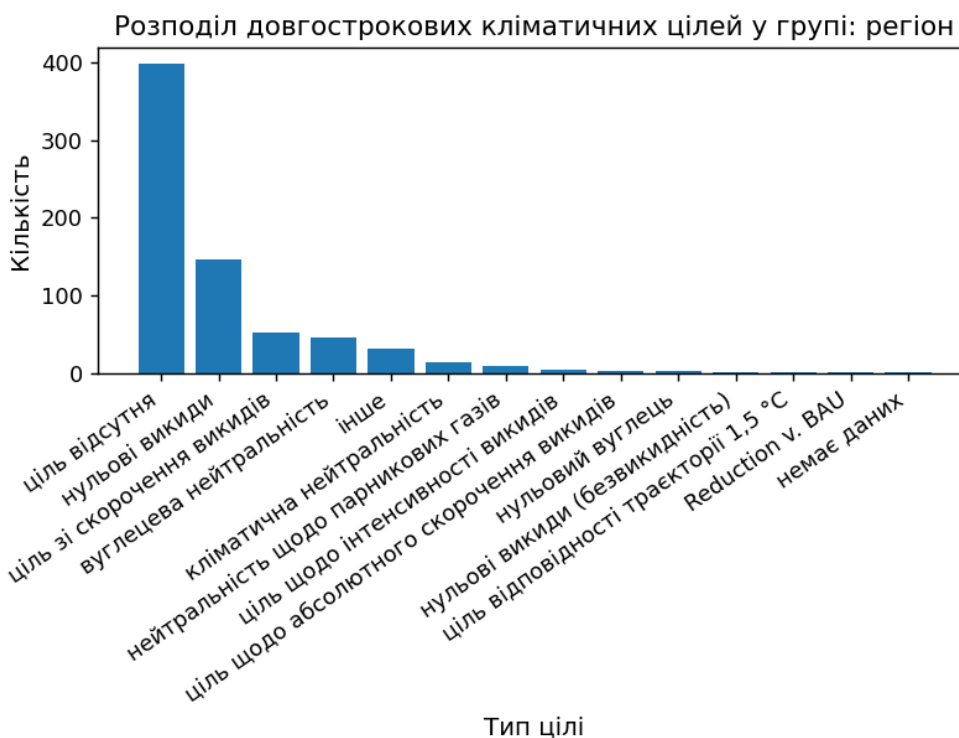


Рис. Б4. Розподіл довгострокових кліматичних цілей у групі: регіон

Додаток В

Графічне представлення аналізу взаємозв'язків між викидами, ВВП та населенням для міст та регіонів



Рис. В1. ВВП і викиди парникових газів (група: місто)

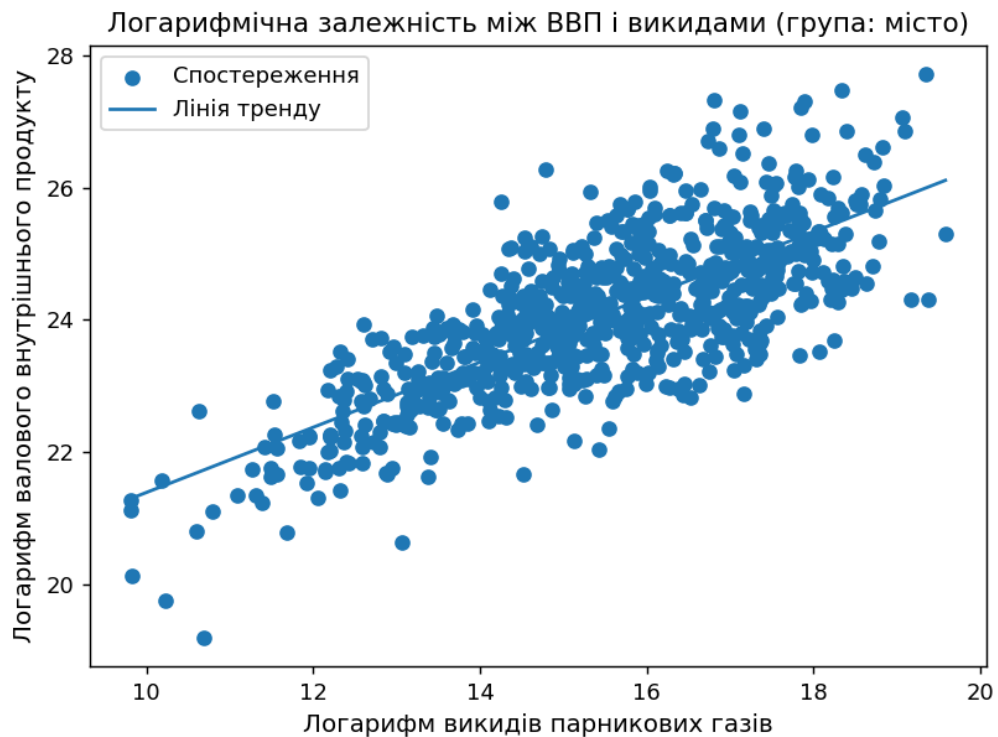


Рис. В2. Логарифмічна залежність між ВВП і викидами (група: місто)

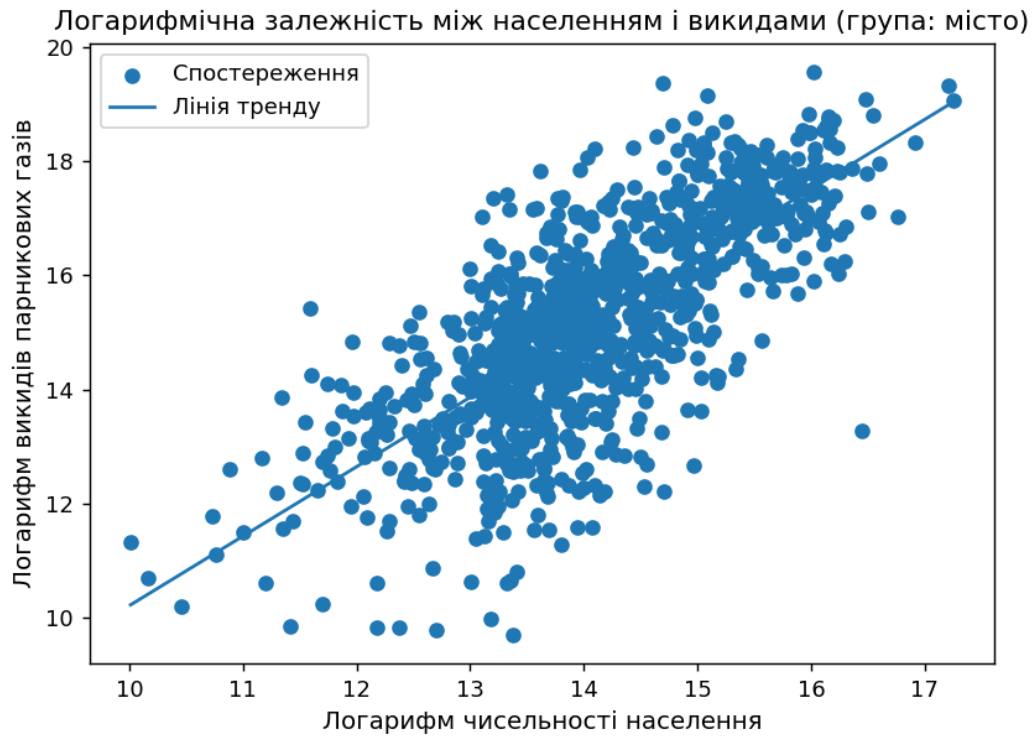


Рис. В3. Логарифмічна залежність між населенням і викидами (група: місто)

Логарифмічна залежність між ВВП на одну особу та вуглецевою інтенсивністю (група: місто)

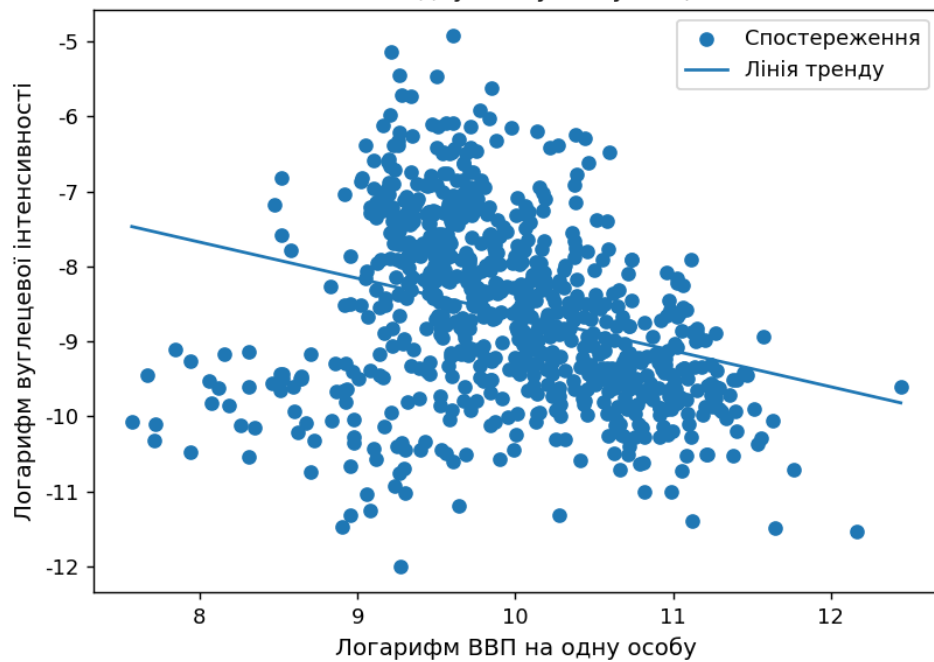


Рис. В4. Логарифмічна залежність між ВВП на одну особу та вуглецевою інтенсивністю (група: місто)

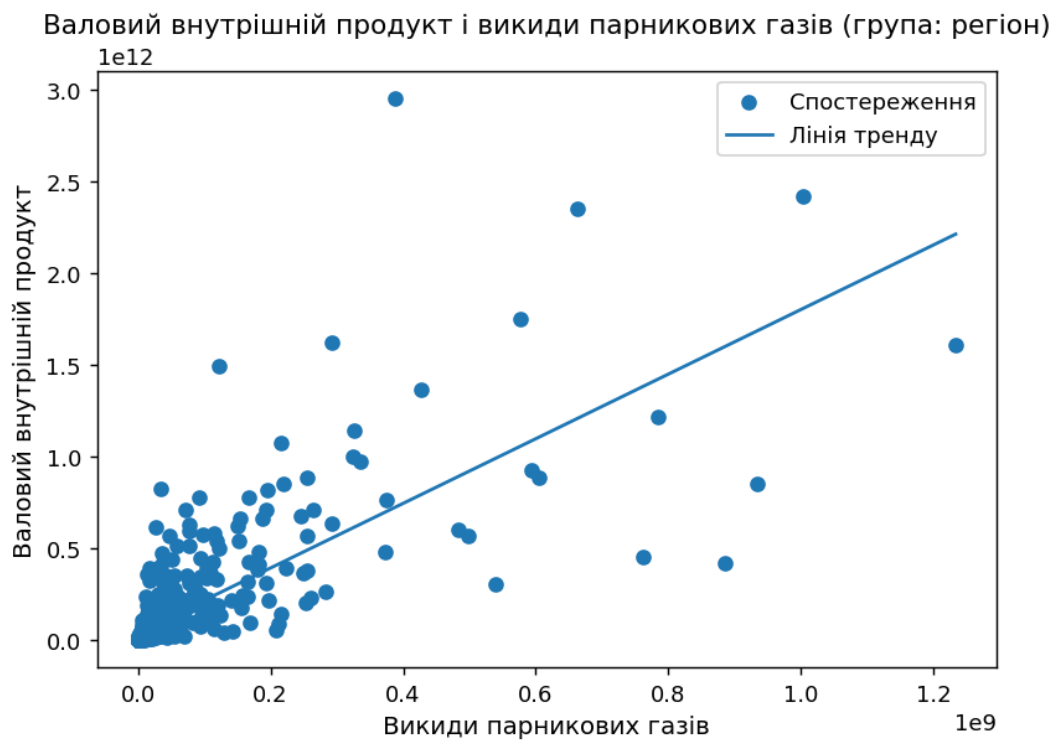


Рис. В5. ВВП і викиди парникових газів (група: регіон)

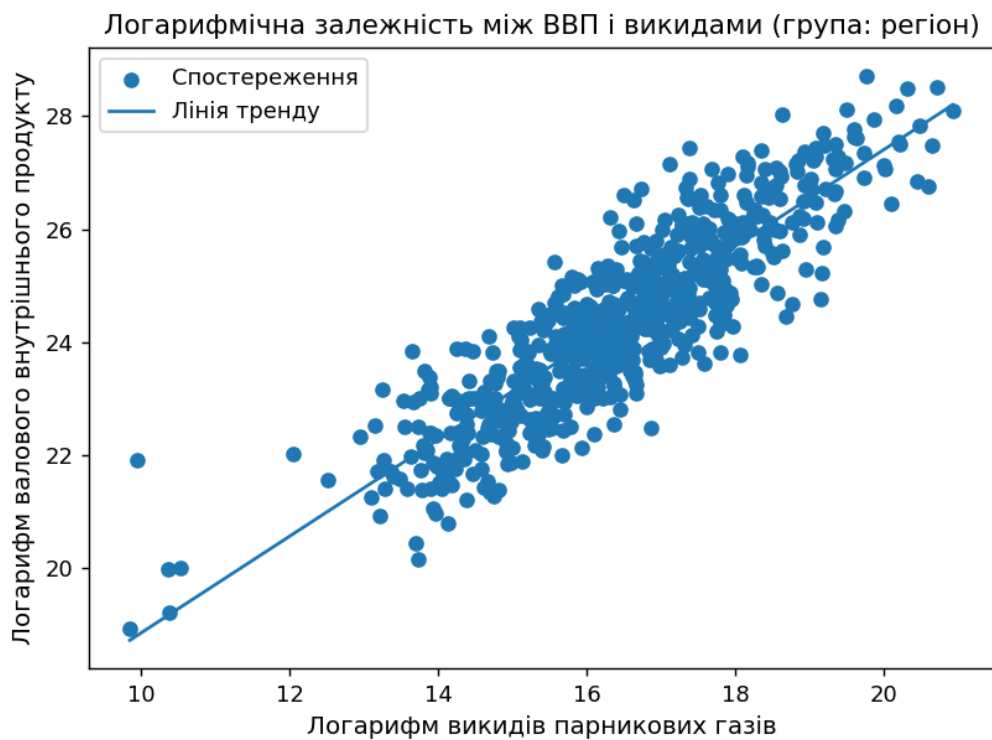


Рис. В6. Логарифмічна залежність між ВВП і викидами (група: регіон)

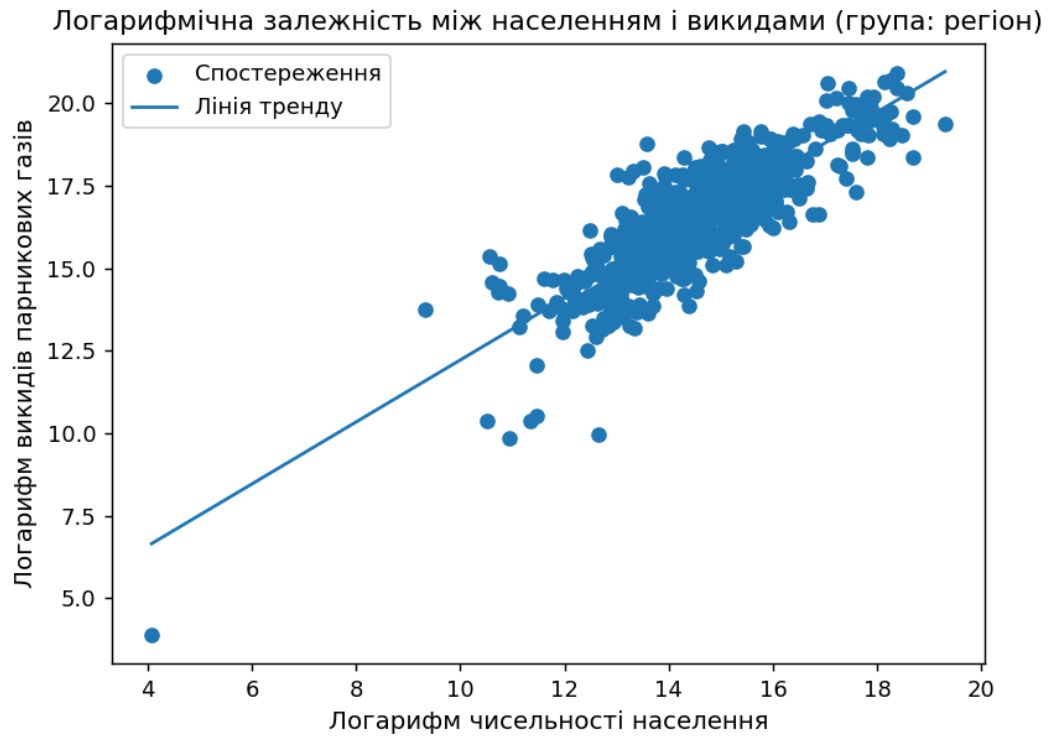


Рис. В7. Логарифмічна залежність між населенням і викидами (група: регіон)

Логарифмічна залежність між ВВП на одну особу та вуглецевою інтенсивністю (група: регіон)

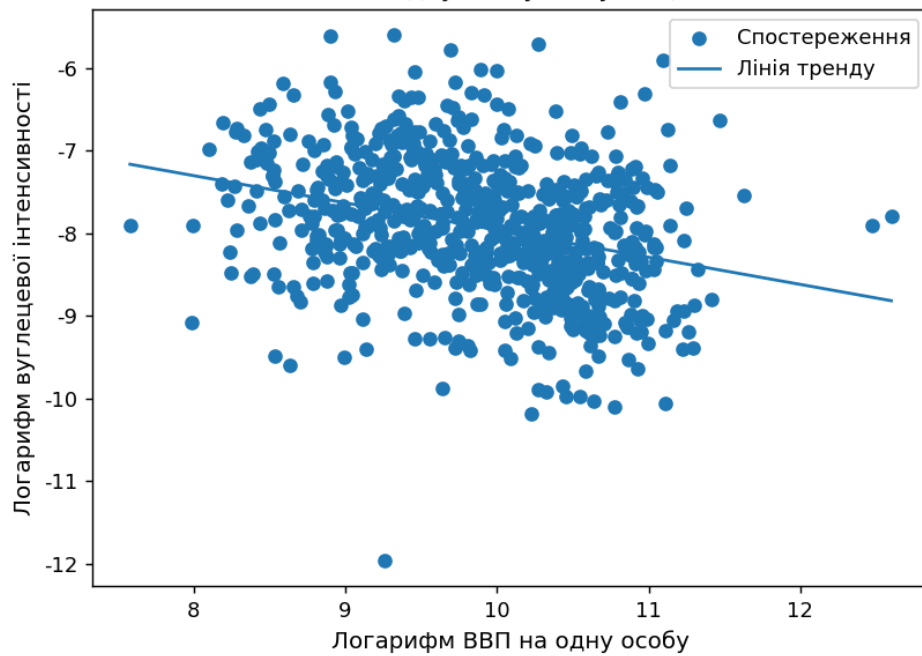


Рис. В8. Логарифмічна залежність між ВВП на одну особу та вуглецевою інтенсивністю (група: регіон)

Додаток Г

Порівняльний аналіз показників декарбонізації за наявністю цілі нульових викидів

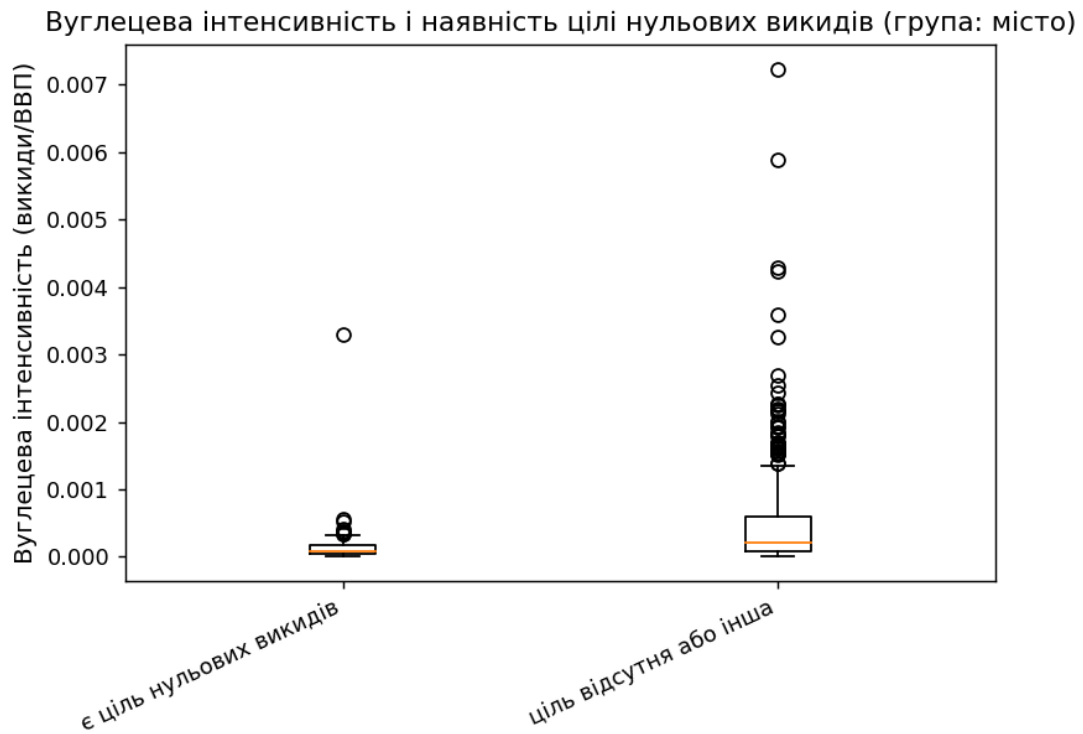


Рис. Г1. Вуглецева інтенсивність і наявність цілі нульових викидів (група: місто)

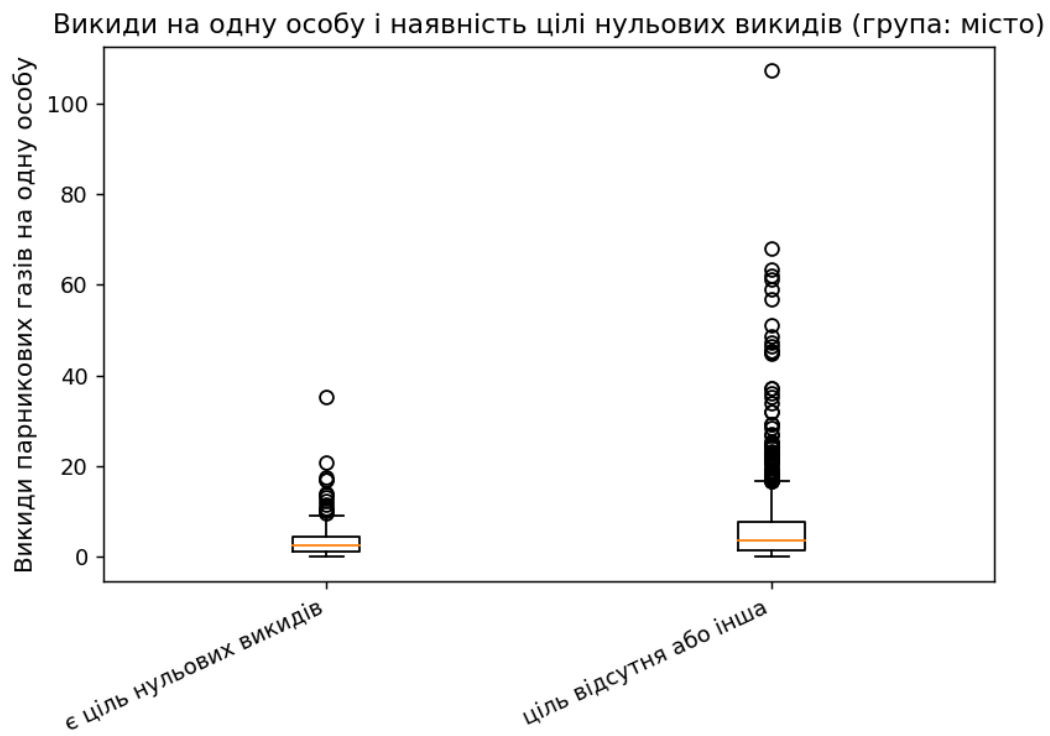


Рис. Г2. Викиди на одну особу і наявність цілі нульових викидів (група: місто)

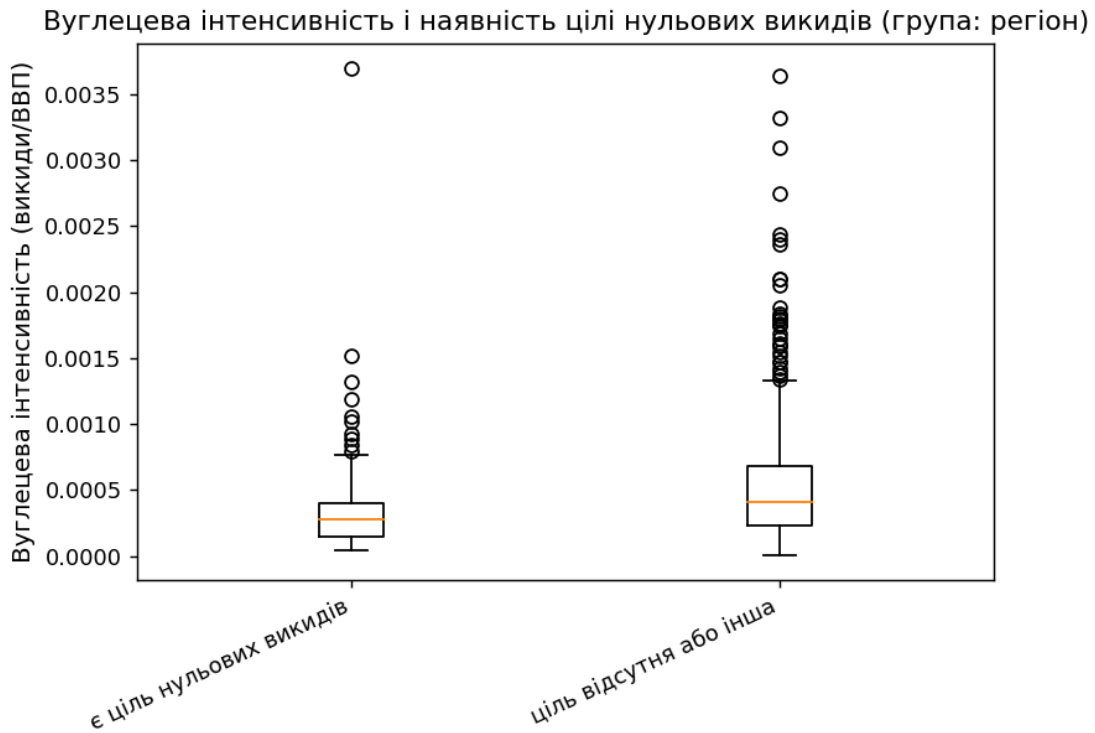


Рис. Г3. Вуглецева інтенсивність і наявність цілі нульових викидів (група: регіон)

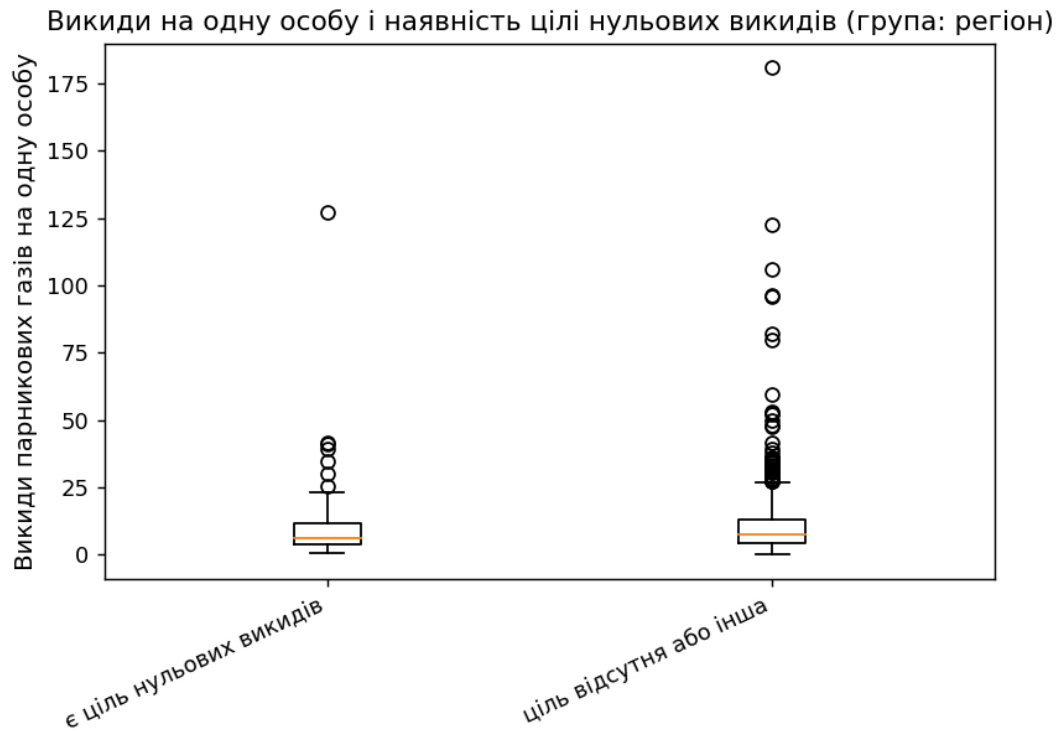
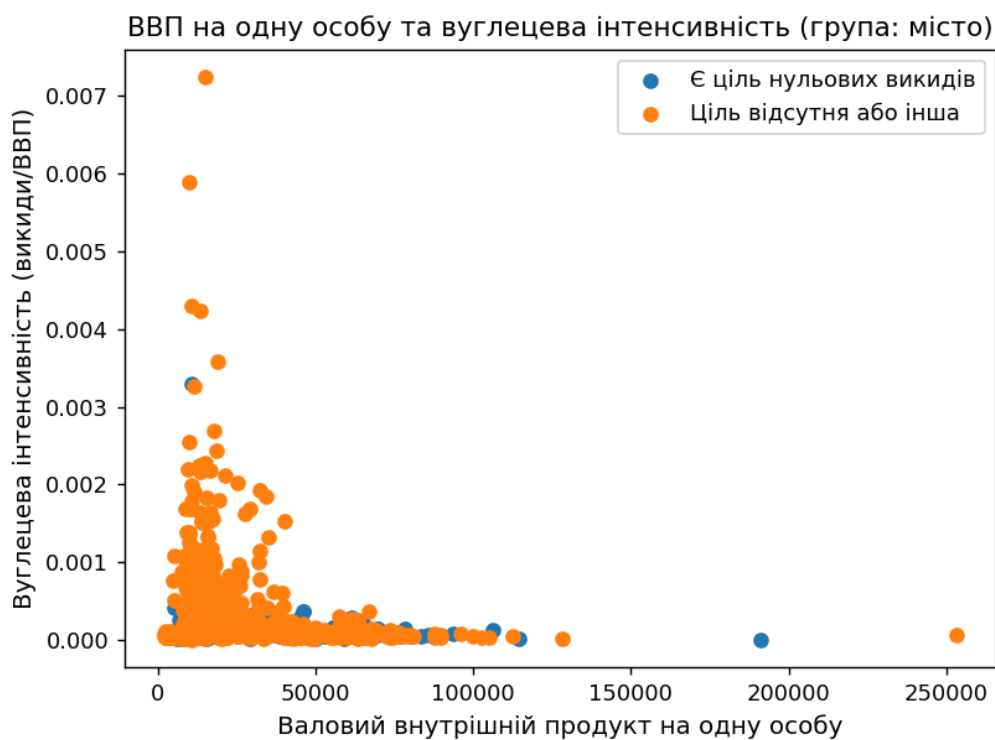


Рис. Г4. Викиди на одну особу і наявність цілі нульових викидів (група: регіон)

Додаток Д

ВВП на одну особу та вуглецева інтенсивність з поділом за наявністю цілі



нульових викидів

Рис. Д1. ВВП на одну особу та вуглецева інтенсивність (група: місто)

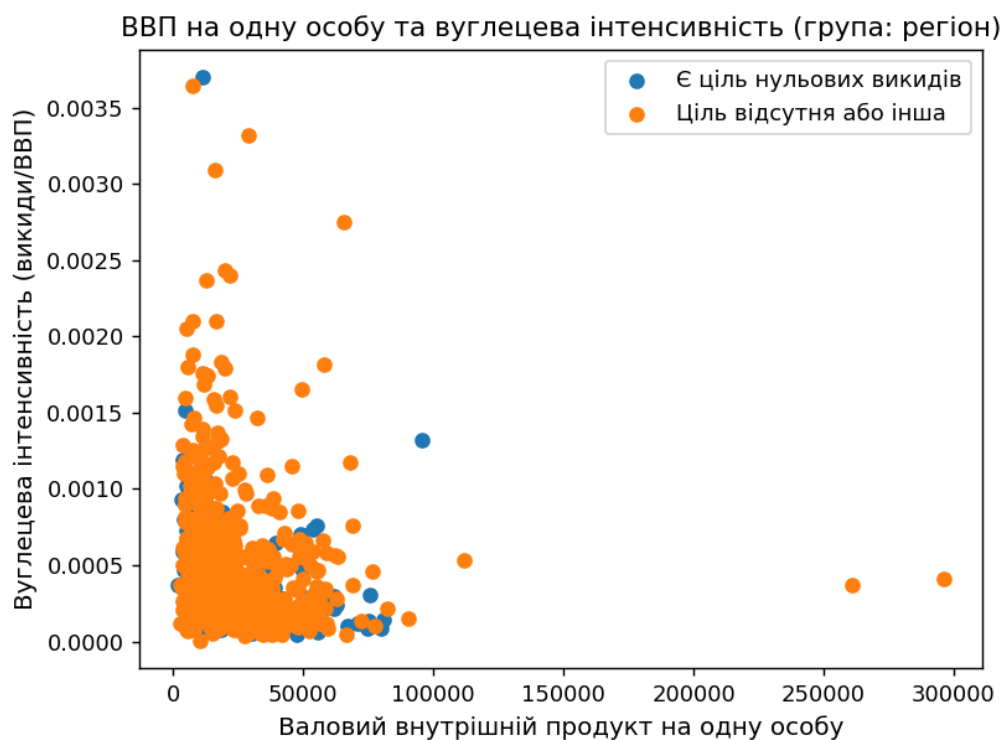


Рис. Д2. ВВП на одну особу та вуглецева інтенсивність (група: регіон)

Додаток Е

Результати сценарного аналізу викидів у довгостроковому горизонті

Сценарна траєкторія викидів: місто (медіана та міжквартильний інтервал)

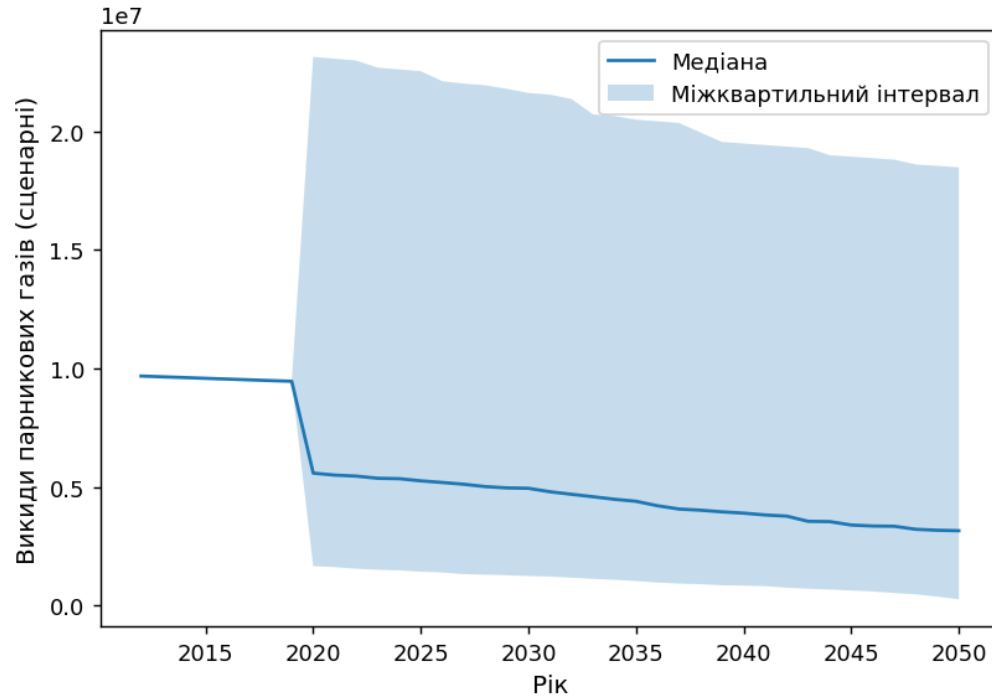


Рис. Е1. Сценарна траєкторія викидів: місто (медіана та міжквартильний інтервал)

Сценарна траєкторія викидів: регіон (медіана та міжквартильний інтервал)

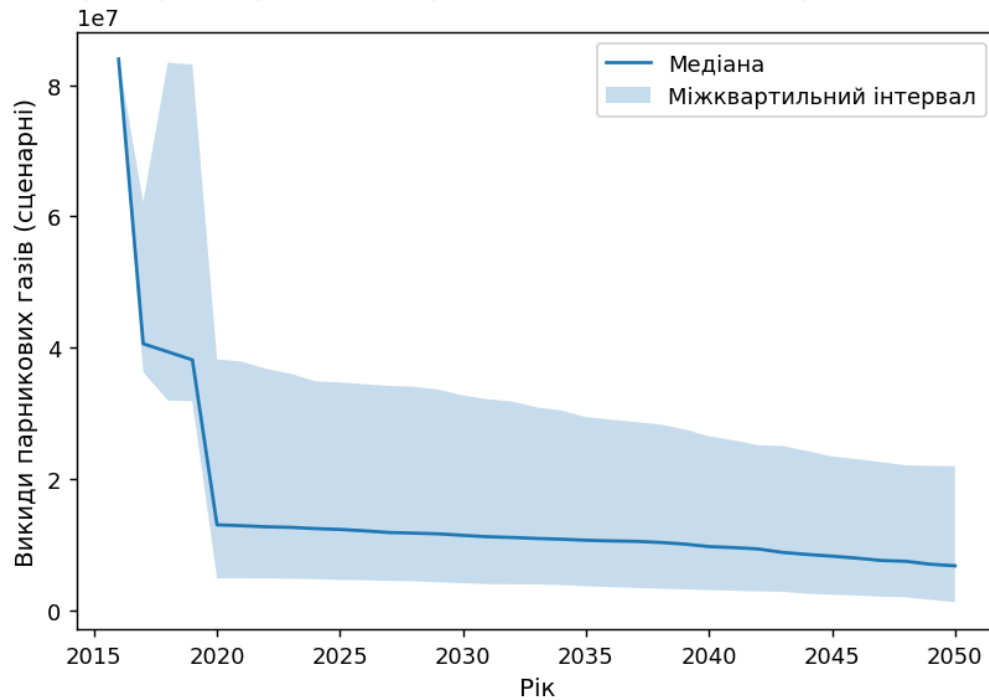


Рис. Е2. Сценарна траєкторія викидів: регіон (медіана та міжквартильний інтервал)

Сценарна траєкторія викидів у групі місто: поділ за наявністю цілі нульових викидів

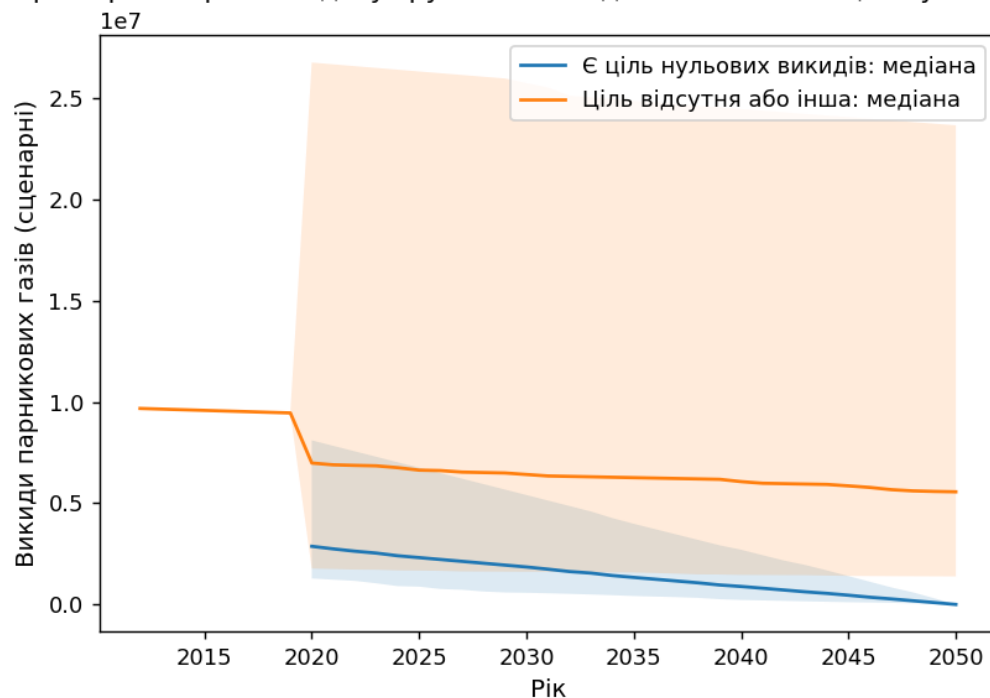


Рис. Е3. Сценарна траєкторія викидів у групі місто: поділ за наявністю цілі нульових викидів

Сценарна траєкторія викидів у групі регіон: поділ за наявністю цілі нульових викидів

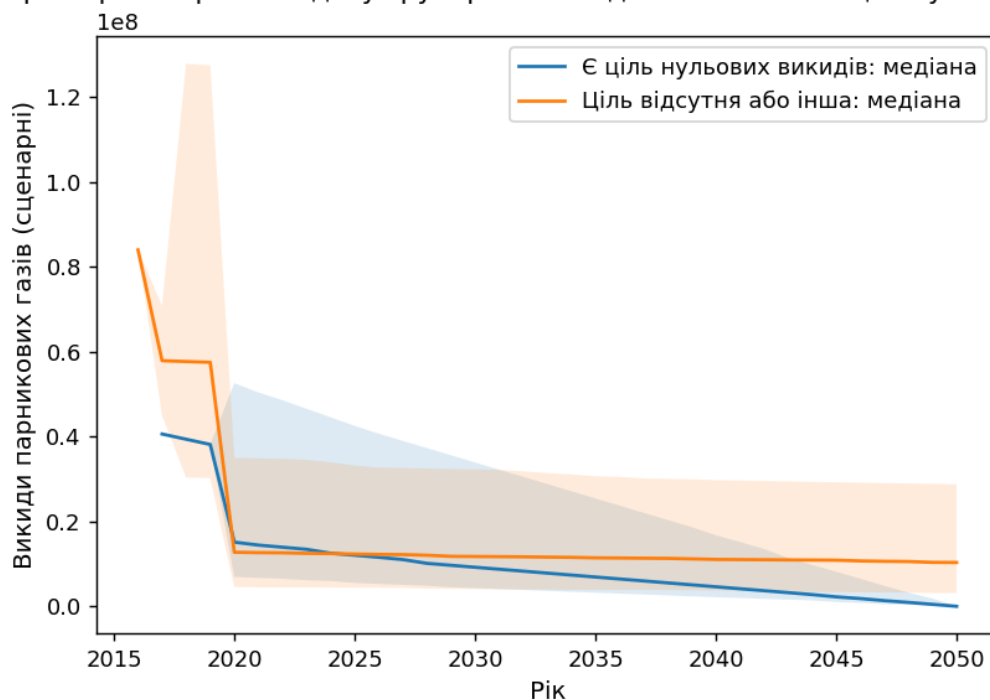


Рис. Е4. Сценарна траєкторія викидів у групі регіон: поділ за наявністю цілі нульових викидів



**Товариство з обмеженою відповідальністю
«ТЕХНО-БУД-ЦЕНТР»**

46008, м. Тернопіль, вул. Шептицького, 4
ЄДРПОУ 33768346, ІПН 337683419187
тел. (0352) 43-23-06

п/р UA4832820900000260070100372291 в
АБ "Південний, МФО 328209
тел./факс (0352) 43-52-38

Вих. № 535
10 листопада 2025 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Баб'яра Всеволода Павловича

«Процеси декарбонізації глобальної циркулярної економіки»

Даний Акт складений про те, що при реалізації багатьох програмних проектів у товаристві з обмеженою відповідальністю «ТЕХНО - БУД – ЦЕНТР» використано результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри міжнародної економіки Західноукраїнського національного університету Баб'яра Всеволода Павловича.

Автором запропоновано:

- система індикаторів моніторингу та оцінки прогресу декарбонізації циркулярної економіки на національному (регіональному) рівні, що включає кількісні показники скорочення викидів від управління відходами, а також відносні показники ефективності використання матеріалів;
- методичні рекомендації щодо формування державної політики підтримки «циркулярних інновацій», які забезпечують одночасне скорочення матеріалосності та вуглецевої інтенсивності, зокрема, через механізми «зелених» публічних закупівель та податкових пільг.

Товариством з обмеженою відповідальністю «ТЕХНО – БУД – ЦЕНТР» були впроваджені : Елементи Системи індикаторів моніторингу та Методичні рекомендації у розробку проекту плану дій товариства з циркулярної економіки ; процес формування бюджетної програми підтримки товариства; підготовку щорічного звіту з екології.

Директор ТОВ
«ТЕХНО-БУД-ЦЕНТР»



Петро ТЕСЕЛЬСЬКИЙ



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«К+С УКРАЇНА»

05 листопада 2025 року
вих. № 05/11-2025/1

Акт
про впровадження результатів дисертаційної роботи

Баб'яра Всеволода Павловича
«Процеси декарбонізації глобальної циркулярної економіки»

Даний акт складений про те, що при реалізації багатьох програмних проєктів у товаристві з обмеженою відповідальністю «К+С УКРАЇНА» використано результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри міжнародної економіки Західноукраїнського національного університету Баб'яра Всеволода Павловича.

Автором запропоновано:

- система індикаторів моніторингу та оцінки прогресу декарбонізації циркулярної економіки на національному (регіональному) рівні, що включає кількісні показники скорочення викидів від управління відходами, а також відносні показники ефективності використання матеріалів;

- методичні рекомендації щодо формування державної подлітки підтримки «циркулярних інновацій», які забезпечують одночасне скорочення матеріалоемності та вуглецевої інтенсивності, зокрема, через механізми «зелених» публічних закупівель та податкових пільг.

Товариством з обмеженою відповідальністю «К+С УКРАЇНА» були впроваджені: Елементи Системи індикаторів моніторингу та Методичні рекомендації у розробку проєкту плану дій товариства з циркулярної економіки; процес формування плану імпорту хімічних продуктів; приведення діяльності товариства у відповідність екологічному законодавству.

Директор
ТОВ «К+С УКРАЇНА»



Оксана ДЯЧИШИН

Товариство з обмеженою відповідальністю
«К+С УКРАЇНА»

46001, місто Тернопіль,
вулиця Дениса Січинського, 10

IBAN: UA463282090000026008030011859
в АБ «Південний», МФО 328209

+38 (0352) 22 55 12

Код ЄДРПОУ 38248587
ІПН 382485819151

IBAN: UA153003350000000260012195380
в АТ «Райффайзен Банк», МФО 300335