

Пуцентейло П.Р.,
д-р екон. наук, професор, професор кафедри
бізнес-аналітики та інноваційного інжинірингу,
Брич В.Я.,
д-р екон. наук, професор,
директор Навчально-наукового інституту інноватики,
природокористування та інфраструктури,
Бруханський Р.Ф.,
д-р екон. наук, професор, завідувач кафедри
бізнес-аналітики та інноваційного інжинірингу,
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль,
Домбровська Н.Р.,
канд. екон. наук, доцент,
доцент кафедри фундаментальних та спеціальних дисциплін,
Чортківський навчально-науковий інститут підприємництва і бізнесу
Західноукраїнського національного університету, м. Тернопіль

РОЗВИТОК ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ: ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ТА СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ГЛОБАЛЬНИХ ТЕНДЕНЦІЙ

Putsenteilo P.R.,
dr.sc.(econ.), professor, professor at the department
of business analytics and innovative engineering,
Brych V.Ya.,
dr.sc.(econ.), professor, director at the ESINMI,
Brukhanskyi R.F.,
dr.sc.(econ.), professor, head at the department
of business analytics and innovative engineering,
West Ukrainian National University, Ternopil,
Dombrovska N.R.,
cand.sc.(econ.), associate professor,
associate professor at the department of fundamental and special disciplines,
Chortkiv Education and Research Institute of Entrepreneurship
and Business of West Ukrainian National University, Ternopil

DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES: ECONOMIC ASPECTS OF PRODUCTION AND STATISTICAL ANALYSIS OF GLOBAL TRENDS

Постановка проблеми. Енергетичні ресурси – основа функціонування сучасної економіки. Однією з характерних тенденцій у розвитку світової енергетики стало використання альтернативних джерел енергії. Використання відновлюваних джерел енергії є одним із важливих способів зменшення енергетичної залежності окремих держав і регіонів від імпорту вуглеводневого палива з країн-«енергомонополістів», пом'якшення економічних криз. На відміну від вуглеводневого палива, поновлювані джерела енергії є в будь-якій точці земної кулі, їхній потенціал у кожній конкретній країні є значним, а його реалізація може стати важливим фактором імпортозаміщення вуглеводнів та енергетичної незалежності країн, що не мають запасів органічного палива.

Тренд розвитку сучасної світової енергетики полягає у зростанні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) і скороченні традиційної енергетики. У 2010–2023 роках обсяги введення ВДЕ у світі

перевищили обсяги введення об'єктів традиційної енергетики, і надалі це співвідношення збільшуватиметься на користь невикопного палива.

За прогнозами Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), до 2050 року у світі сонячними електростанціями буде вироблено 25 % електроенергії, вітряними – 35 % [1]; світові інвестиції в сонячну енергетику становитимуть 4,2 трлн дол. США, у вітряну – 5,3 трлн дол. США; обсяг інвестицій у традиційну паливну енергетику за цей самий період не перевищить 1,5 трлн дол. США [1]. Наведені дані свідчать про те, що у світовому співтоваристві ухвалено рішення про необхідність переходу від паливних джерел енергії до поновлюваних. Отже, впровадження технологій, заснованих на ВДЕ, є визначальною тенденцією розвитку світової енергетики. Нерівномірний розподіл запасів вуглеводнів, зростаючий попит на них з боку країн, що розвиваються, та екологічні ризики, пов'язані з виробництвом і споживанням викопних ресурсів, зумовили зростання інтересу багатьох держав до цієї сфери.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним проблемам розвитку ВДЕ в Україні присвячено низку наукових праць вчених та практиків, зокрема Є. Боброва, Г. Гелетути, С. Денисюка, В. Каплуна, С. Кудрі, Г. Півняка, Ю. Сібікіна, А. Шидловського, Є. Шкурідина та багатьох інших.

Більшість зазначених авторів головним напрямом модернізації енергетичної галузі вважають розвиток так званої відновлюваної (нетрадиційної «зеленої») енергетики. У широкому сенсі цей термін охоплює впровадження енергоефективних технологій та використання екологічно чистих відновлюваних джерел енергії. Розвиток відновлюваної енергетики передбачає залучення таких джерел, як сонячна, вітрова, геотермальна енергія, а також біомаса, гідроенергетика і воднева енергетика. Особливу увагу приділяють створенню інноваційних технологій, які сприяють зменшенню викидів парникових газів, підвищенню енергетичної незалежності та формуванню сталого розвитку суспільства.

Реалізація цих заходів дозволяє не лише зменшити залежність від викопних видів палива, але й забезпечити економічне зростання за рахунок створення нових робочих місць та інвестицій у наукові дослідження й розробки. Відтак, альтернативна енергетика є важливим інструментом у вирішенні глобальних енергетичних та екологічних викликів.

Останнім часом відновлювані джерела енергії стали предметом значної уваги у наукових дослідженнях, що підтверджується великою кількістю відповідних публікацій. Водночас, у роботах вітчизняних авторів акцент здебільшого робиться на окремих аспектах, зокрема на виробництві електричної енергії з відновлюваних джерел, тоді як комплексний підхід до розвитку і подальших перспектив відновлюваної енергетики часто залишається поза увагою.

Крім того, незважаючи на значну кількість теоретичних і практичних напрацювань, багатогранність проблем, пов'язаних із розвитком альтернативних джерел енергії в Україні, зумовлює недостатній рівень їх дослідження, особливо щодо впливу на формування позитивних тенденцій у національній та світовій економіці, підвищення рівня її енергоефективності.

Постановка завдання. Метою статті є аналітичне дослідження розвитку відновлюваних джерел енергії: економічні аспекти виробництва, статистичний аналіз глобальних тенденцій, визначення ключових чинників, що впливають на динаміку сектору, та оцінювання перспектив його розвитку у контексті світових зусиль із декарбонізації та переходу до сталого енергетичного майбутнього.

Виклад основного матеріалу дослідження. Наразі основою світової енергетичної системи є викопне паливо: воно визначає економічне зростання і сучасний спосіб життя. Однак енергія дедалі більше необхідна суспільству для забезпечення якості життя і розвитку всіх елементів економічної системи. Глобальне економічне зростання призвело до збільшення попиту на первинну енергію. Так, згідно з BP Statistical Review of World Energy 2021, світове споживання первинної енергії у 2020 році знизилося на 4,5 %, що стало найбільшим падінням з часів Другої світової війни [2]. Водночас, за даними IEA Global Energy Review 2021, глобальні викиди CO₂ від енергетичного сектору зменшилися на 5,8 % у 2020 році, що є найбільшим річним скороченням в історії [3]. Ці дані свідчать про значний вплив пандемії COVID-19 на світову енергетику, що призвело до безпрецедентного зниження споживання енергії та викидів парникових газів.

У 2022 році світова енергетика продемонструвала значні зміни, встановивши новий рекорд: інтенсивність викидів знизилася до найнижчого рівня в історії – 436 г/кВт-год. Частка вітрової та сонячної енергетики зросла до рекордних 12 % від загального світового виробництва електроенергії. Однак, темпи зростання цих джерел енергії все ще не були достатніми, щоб повністю задовольнити зростаючий попит на електроенергію у світі [4].

Зміни в інтенсивності викидів та зростання частки відновлюваних джерел енергії у 2022 році відображають трансформаційні процеси в глобальній енергетиці. Однак, попит на енергію залишається високим, і структура споживання первинної енергії демонструє важливу роль традиційних видів палива. Для розуміння цих тенденцій пропонується розглянути споживання первинної енергії у світі у 2019–2022 роках, розподілене за видами палива в ексаджоулях (рис. 1).

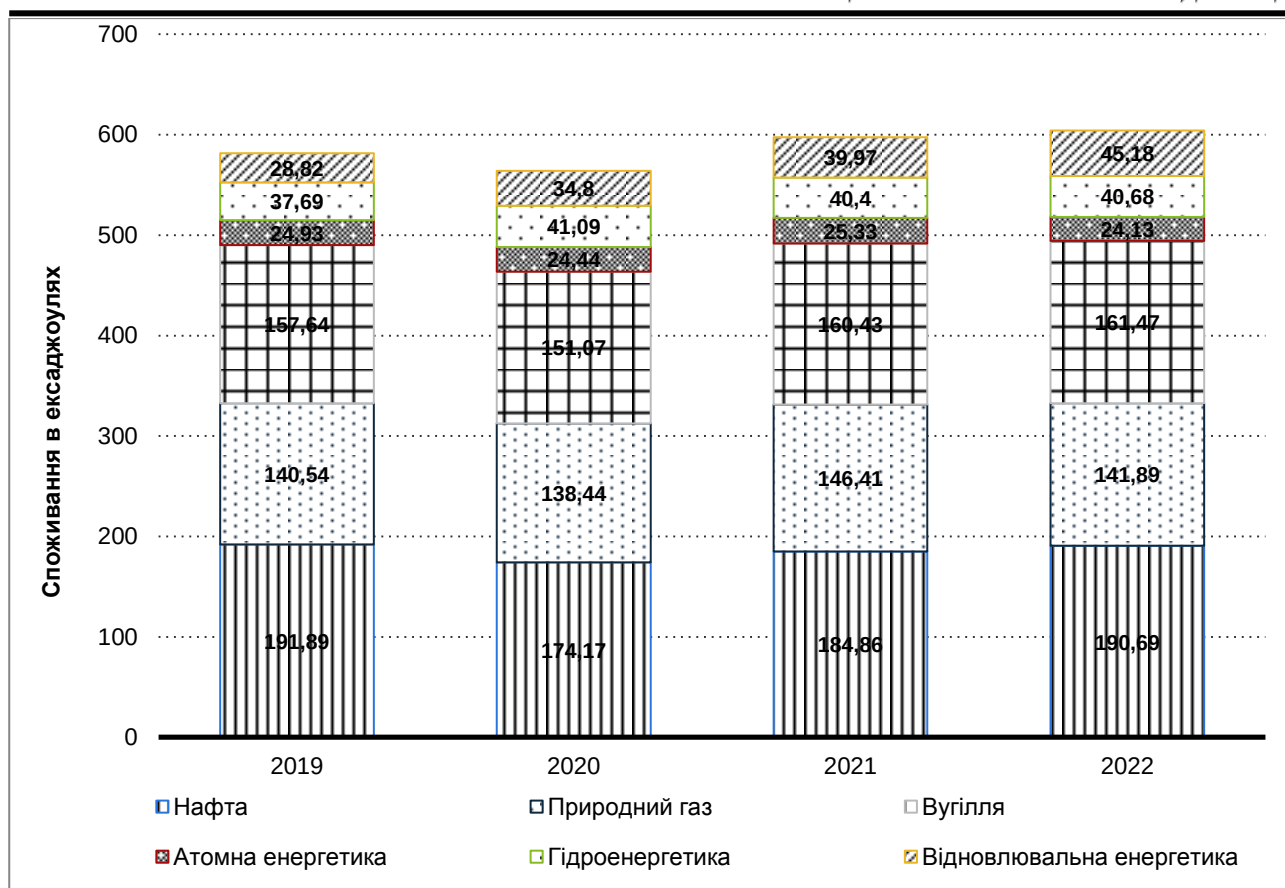


Рис. 1. Споживання первинної енергії у світі у 2019–2022 роках за видами палива (в ексаджоулях)

Джерело: [5]

Проведений деталізований аналіз за окремими видами палива (рис. 1) свідчить про домінуючу роль нафти в світовому енергетичному балансі. Так, у 2019 році споживання становило 191,89 ексаджоулей, але у 2020 році різко знизилося до 174,17 ексаджоулей (-9,2 %) через пандемію COVID-19 і пов'язані з нею обмеження. У 2021–2022 роках споживання нафти поступово відновлюється, досягнувши 190,69 ексаджоулей у 2022 році. Це свідчить про повернення економік до активної діяльності.

Споживання природного газу в 2019 році становило 140,54 ексаджоулей, зниження у 2020 році відбулося до 138,44 ексаджоулей. У 2021 році споживання становило 146,41 ексаджоулей, але у 2022 році знижується до 141,89 ексаджоулей, що може бути пов'язано зі зменшенням поставок через геополітичні події (напад росії на Україну та введення санкцій ЄС на постачання газу країнам Європи).

Вугілля демонструє відносно стабільне споживання. У 2019 році – 157,64 ексаджоулей, у 2022 році – 161,47 ексаджоулей (+2,43 %). Це свідчить про збереження його ролі як основного джерела енергії, попри глобальні зусилля щодо скорочення використання вугілля.

Виробництво електроенергії на атомних електростанціях має найнижчі показники споживання. Так, у 2019 році споживання електроенергії виробленої АЕС склало 24,93 ексаджоулей. У 2020–2022 роках спостерігається поступове зниження до 24,13 ексаджоулей у 2022 році (-3,2 % порівняно з 2019 роком). Зниження може бути пов'язане із закриттям атомних станцій у деяких країнах та збільшенням конкуренції з боку відновлюваних джерел енергії.

У 2019 році гідроенергетика спромоглася надати для споживання 37,69 ексаджоулей, у 2022 році – 40,68 ексаджоулей (+7,9 %). Незначне зростання відображає стабільну роль гідроенергетики як джерела відновлюваної енергії.

У 2019 році від джерел відновлювальної енергетики спожито 28,82 ексаджоулей, але до 2022 року споживання зросло до 45,18 ексаджоулей (+56,8 %). Це найдинамічніше зростання серед усіх джерел енергії, що свідчить про глобальний перехід до сталого розвитку та зеленої енергетики.

Отже, відновлювальна енергетика є найперспективнішим джерелом енергії завдяки зростанню інвестицій і технологічного розвитку. Вугілля та атомна енергетика стикаються зі зниженням частки в структурі споживання через екологічні виклики та громадський тиск. Геополітичні та економічні фактори, такі як пандемія та війни, значно впливають на структуру споживання енергії. Майбутнє енергетичного сектору залежить від інновацій та глобальних зусиль щодо зменшення викидів і переходу до екологічно чистих джерел енергії.

Динамічний розвиток світової енергетики у 2022 році характеризувався зростанням значення відновлюваних джерел енергії, поряд із збереженням значної частки викопного палива у виробництві електроенергії. Для глибшого розуміння змін у світовій енергетичній системі доцільно розглянути структуру виробництва електроенергії за джерелами енергії у 2022 році (рис. 2).

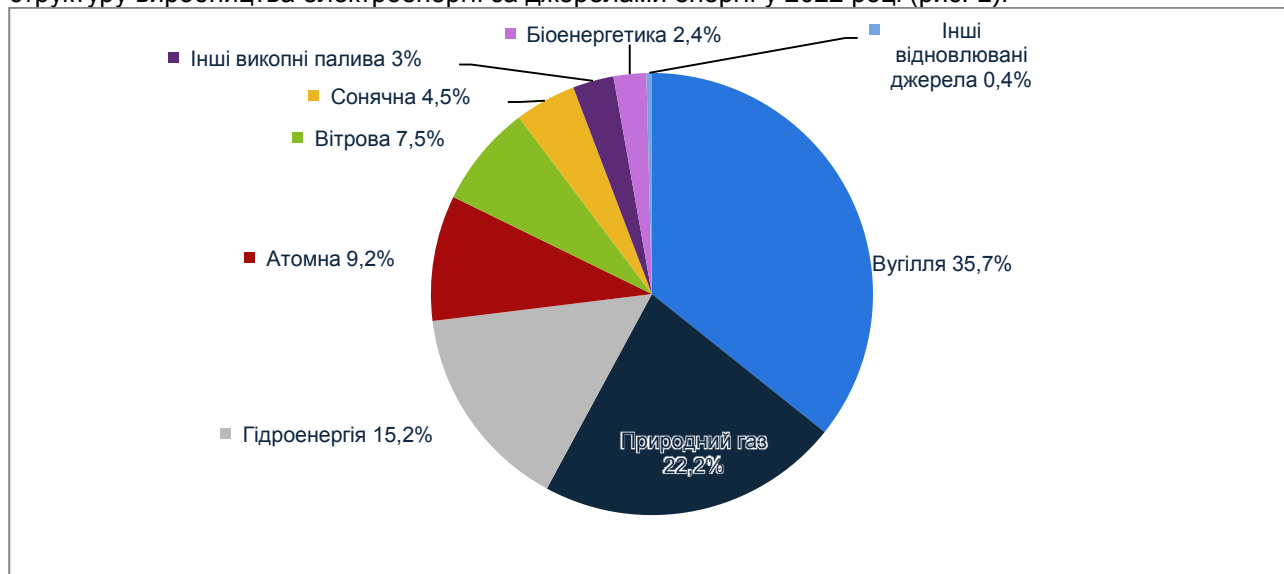


Рис. 2. Розподіл виробництва електроенергії у світі у 2022 році за джерелами енергії
Джерело: [5]

Ця діаграма є наочною демонстрацією сучасного стану світового енергетичного балансу та вказує на основні напрями подальшої трансформації енергетичної системи. Діаграма відображає структуру виробництва електроенергії у світі у 2022 році, демонструючи частки різних джерел енергії у глобальному енергетичному балансі. Так, викопні джерела енергії відіграють домінуючу роль у виробництві електроенергії в світі.

Вугілля залишається домінуючим джерелом електроенергії у світі (35,7 %). Його висока частка пояснюється доступністю ресурсів, низькою вартістю видобутку та залежністю багатьох країн, зокрема Китаю й Індії, від вугільних електростанцій. Незважаючи на активний перехід до відновлюваних джерел, вугілля залишається ключовим через енергетичну кризу та зростання вартості альтернативних ресурсів.

Природний газ є другим за значенням джерелом (22,2 %). Газові електростанції забезпечують гнучкість у генерації електроенергії, швидко реагуючи на коливання попиту. У 2022 році роль природного газу знизилася в окремих регіонах через високі ціни, однак залишається важливою складовою глобальної енергосистеми.

Інші викопні палива (3 %) включають нафту та інші види палива, що використовуються у специфічних умовах. Їхня частка залишається невеликою через високу вартість і обмежену ефективність у виробництві електроенергії.

Відновлювані джерела енергії є перспективним джерелом виробництва електроенергії. Гідроенергетика залишається найважливішим відновлюваним джерелом енергії (15,2 %). Вона активно використовується в країнах із значними водними ресурсами, таких як Бразилія та Канада. Обмеження подальшого зростання пов'язані з екологічними наслідками будівництва дамб і залежністю від кліматичних умов.

Вітрова енергетика демонструє стабільне зростання завдяки значним інвестиціям у вітрові парки, особливо в Європі, США та Китаї (7,5 %). Її частка збільшується завдяки технологічному прогресу, який підвищує ефективність турбін.

Сонячна енергетика продовжує зростати найшвидшими темпами серед відновлюваних джерел завдяки зниженню вартості сонячних панелей і державним програмам підтримки і станом на 2022 рік займає 4,5 %.

Біоенергетика (2,4 %) та інші відновлювані джерела (0,4 %) у структурі займають мізерну частку, проте їх роль поступово зростатиме. Біоенергетика залишається локальним джерелом, що використовується переважно у регіонах із доступом до біомаси. Інші відновлювані джерела (наприклад, геотермальна енергія) поки що мають мінімальну частку через високу вартість і технологічні обмеження.

Атомна енергія (9,2 %) продовжує відігравати важливу роль, забезпечуючи стабільну генерацію без викидів CO₂. Її розвиток у 2022 році обмежувався високими витратами на будівництво нових реакторів і суспільними побоюваннями щодо безпеки, попри стратегічні плани багатьох країн (наприклад, Франції) щодо її модернізації.

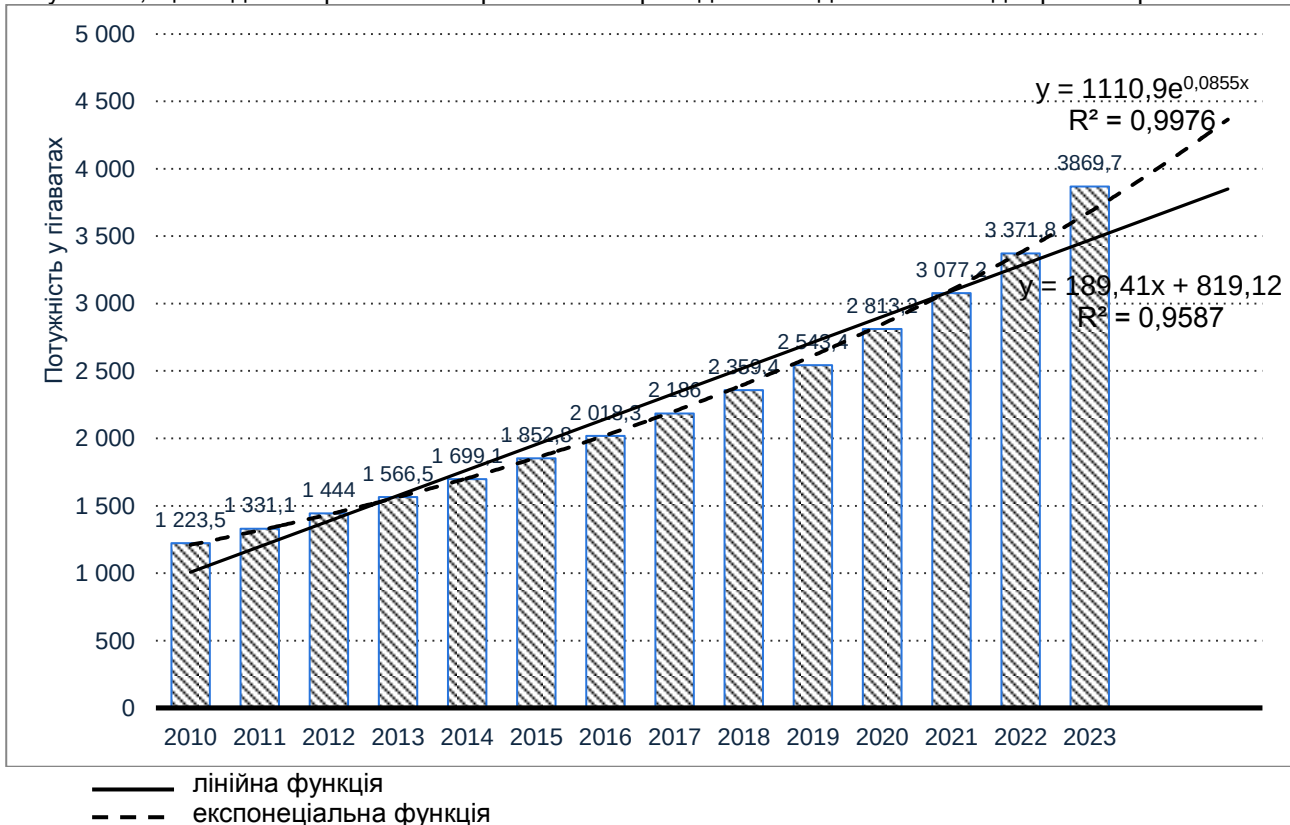
Невелику частку альтернативної енергії у світовому енергобалансі можна пояснити новизною альтернативних джерел. Вони стали активно використовуватися нещодавно порівняно з викопним паливом, яке формувало поточну енергетичну систему протягом століття. Проте споживання «зеленої» енергії зростає високими темпами. Це зростання забезпечується за рахунок швидкого освоєння сонячних і вітряних технологій, значного зниження витрат на виробництво відновлюваної енергії. Так, у 2023 році відновлювані джерела енергії становили 24,5 % енергії, спожитої в ЄС, порівняно з 23,0 % у 2022 році. Частка енергії з відновлюваних джерел, що використовується на транспорті в ЄС, досягла 10,8 % у 2023 році проти 9,6 % у 2022 році [6].

Відновлювана енергетика є одним із напрямів світової енергетичної галузі, що динамічно розвивається. За темпами приросту встановленої потужності енергоустановок, що використовують ВДЕ, вона посідає перше місце серед інших видів джерел енергії. У 2023 році глобальні потужності відновлюваної енергетики зросли на 50 % порівняно з 2022 роком, досягнувши рекордного приросту в 510 ГВт [7].

Витрати на перехід до екологічно чистої енергетики у 2023 році у світі зросли на 17 % (до \$1,8 трлн). Це рекордний рівень, але його недостатньо, щоб досягти нульових викидів, йдеться у звіті Bloomberg NEF. До цих витрат відносяться інвестиції у встановлення ВДЕ, купівлю електромобілів, будівництво систем виробництва водню та впровадження інших технологій. Сьогодні КНР залишається найбільшим ринком із великим відривом. У 2021 році в КНР витратили \$676 млрд: зростання на 6 % порівняно з 2022 роком. Інвестиції в США, Великій Британії та Європі зросли на 22 %, склавши \$718 млрд [7].

Вкладення у відновлювану енергетику збільшилися на 8 % (до \$623 млрд). Деякі технології, що зароджуються, пережили бурхливе зростання. Наприклад, інвестиції у водневу галузь потроїлися і склали \$10,4 млрд, що є ознакою зростання інтересу до цієї технології [7].

На рис. 3 представлено зростання сукупної потужності відновлюваної енергетики у світі за період з 2010 по 2022 рік у гігаватах. За цей період спостерігається стабільне зростання встановленої потужності, що свідчить про активний розвиток і впровадження відновлюваних джерел енергії.



**Рис. 3. Сукупна потужність відновлюваної енергетики у світі
у 2010–2023 роках (у гігаватах)**

Джерело: розраховано за даними [5; 8]

Аналіз даних щодо сукупної потужності відновлюваної енергетики у світі за період із 2010 по 2023 рік свідчить, що загальна потужність відновлюваної енергетики у світі зростала щороку протягом аналізованого періоду. За весь аналізований період 2010–2023 рр. абсолютний приріст зріс у 4,6 рази: від 107,6 ГВт у 2011 році до 497,9 ГВт у 2023 році. Так, у 2010 році сукупна потужність складала 1223,5 ГВт, тоді як у 2023 році досягла 3869,7 ГВт. Це свідчить про значне збільшення – більш ніж у 3,16 раза за 13 років. У період 2010–2015 рр. середній річний приріст склав близько 126,86 ГВт. Найнижчий

приріст зафіксовано у 2011 році – 107,6 ГВт. З кожним роком темпи зростання поступово збільшувалися, і у 2015 році приріст досяг 153,7 ГВт, що на 46,1 ГВт більше, ніж у 2011 році. У період 2016–2020 середній приріст зріс до 210,1 ГВт на рік. У 2020 році було відзначено стрибок – 270,0 ГВт, що на 104,5 ГВт більше, ніж у 2016 році. Це може бути пов'язано з політикою підтримки ВДЕ у світі та зростанням інвестицій у цей сектор. Протягом 2021–2023 рр. середній річний приріст досяг 351,9 ГВт. У порівнянні з 2022 роком, у 2023 році приріст зріс на 203,3 ГВт. Це свідчить про активну інтеграцію відновлюваних технологій у енергетичні системи світу. У 2023 році приріст склав 497,9 ГВт, що є рекордним значенням за весь період.

У перші роки аналізованого періоду приріст був відносно стабільним: 2010–2015 роки (п'ятирічний період): приріст 629,3 ГВт; 2016–2020 роки (п'ятирічний період): приріст 795,1 ГВт. Це свідчить про прискорення розвитку у другій половині періоду. У 2021–2023 роках сукупний приріст склав 792,5 ГВт, що майже дорівнює приросту за весь п'ятирічний період 2016–2020 рр.

Отже, графік на рис. 3 демонструє стабільне зростання сукупної потужності відновлюваної енергетики протягом 2010–2023 років.

Суцільна лінія на графіку рис. 3 з рівнянням $y = 189,41x + 819,12$ та коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9587$ відображає лінійну апроксимацію даних. R^2 близький до 1 (максимальне значення 1), що вказує на досить хорошу відповідність лінійної моделі даним у цьому проміжку часу.

Рівняння $y = 189,41x + 819,12$ означає, що потужність щороку збільшувалася приблизно на 189,41 ГВт.

Пунктирна лінія з рівнянням $y = 1110,9e^{0,0855x}$ та коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9976$ відображає експоненціальну апроксимацію даних. R^2 ще ближчий до 1, що свідчить про дуже точну відповідність експоненціальної моделі даним після 2018 року. Експоненціальна модель краще описує дані після 2018 року, вказуючи на значне прискорення темпів зростання потужності відновлюваної енергетики. Показник 0,0855 в експоненті вказує на темп зростання приблизно 8,55 % на рік.

Отже, темпи зростання не є лінійними, а скоріше експоненціальними, особливо після 2018 року. Експоненціальний характер зростання дає підстави для оптимістичних прогнозів щодо подальшого розвитку відновлюваної енергетики.

Детальна структура потужності відновлюваної енергетики у світі наведена на рис. 4.



Рис. 4. Існуюча потужність відновлюваної енергетики у світі у 2010–2023 роках (у гігаватах)

Джерело: розраховано за [5; 8]

Загальна потужність відновлюваної енергетики (включаючи гідроенергетику) у 2010 році налічувала 1250 ГВт, а у 2023 році – 4034 ГВт. Абсолютне зростання склало +2784 ГВт, середньорічне зростання $\approx 214,15$ ГВт/рік.

Потужність відновлюваної енергетики без урахування гідроенергетики у 2010 році складала 315 ГВт, а у 2023 році – 2790 ГВт, зростання протягом досліджуваного періоду на рівні 2475 ГВт, середньорічне зростання – 190,38 ГВт/рік. Частка відновлюваної енергетики без гідроенергетики у загальній потужності у 2010 році становила 25,2 %, у 2023 році – 69,1 %.

Це свідчить про активний розвиток сучасних технологій ВДЕ (вітрової та сонячної).

Стійку динаміку зростання продемонструвала вітрова енергетика, так, протягом досліджуваного періоду потужність вітрових електростанцій зросла з 198 ГВт у 2010 році до 745 у 2020 році та 1021 ГВт у 2023 році. При цьому абсолютне зростання становило +823 ГВт, середньорічне зростання 63,31 ГВт/рік.

Сонячна енергетика продемонструвала надзвичайно швидке зростання у період з 2010 до 2023 року, так, наприклад, у 2010 році потужність сонячної енергетики складала лише 17,15 ГВт, що становило 5,4 % від відновлюваної енергетики без гідроенергетики, проте у 2020 році показник сягнули позначки 138 ГВт, а у 2023 році – 447,05 ГВт, що становить 16 % від загального обсягу відновлюваної енергетики без урахування гідроенергетики. Абсолютний приріст за ці роки склав 429,9 ГВт, середньорічне зростання становило 33,07 ГВт/рік.

Вітрова енергетика мала більший базовий старт у 2010 році (198 ГВт проти 17,15 ГВт), але сонячна демонструє вищий відносний темп зростання, так, зростання потужності сонячної енергетики зросло у 26 разів протягом 2010–2023 рр., а вітрова лише – в 5 разів. Усе це пояснюється першочергово зниженням вартості сонячних панелей, широким впровадженням сонячної енергетики у домогосподарствах. У майбутньому можна очікувати, що сонячна енергетика перевершить вітрову за потужністю.

Пунктирна лінія на рис. 4 відображає лінійну тенденцію зростання до 2018 року, рівняння $y = 173,75x - 120,84$ з $R^2 = 0,929$ вказує на досить хорошу апроксимацію лінійною функцією в цей період. Це означає, що до 2018 року потужність зростала відносно стабільними темпами. Після 2018 року темпи зростання значно прискорюються, що добре описується експоненціальною функцією $y = 1110,2e^{0,0873x}$ з $R^2 = 0,9948$. Високий коефіцієнт детермінації (R^2) підтверджує точність цієї моделі. Це свідчить про перехід до експоненціального зростання, що означає прискорення темпів розвитку галузі відновлюваної енергетики.

Лінійна апроксимація до 2018 року $y = 198,07x + 790,51$ з $R^2 = 0,9459$ показує, що зростання ВДЕ без врахування гідроенергетики було більш швидким, ніж для загальної потужності з гідроенергетикою. Одночасно, експоненціальна модель $y = 289,84e^{0,1608x}$ з $R^2 = 0,9978$ демонструє ще більш стрімке прискорення зростання після 2018 року. Більший показник в експоненті (0,1608 порівняно з 0,0873) підтверджує це. Лінія тренду вітрової енергетики показує стабільне зростання протягом усього періоду, але темпи зростання менші, ніж у сонячної енергетики, особливо після 2018 року. На графіку видно, що внесок вітрової енергетики в загальну потужність поступово зменшується відносно сонячної. Важливо враховувати, що наведені тренди є апроксимаціями, і реальні темпи зростання можуть змінюватися під впливом різних факторів.

Отже, експоненціальні тренди для обох показників (з та без гідроенергетики) мають значно вищі R^2 , ніж лінійні тренди після 2018 року, що підтверджує перехід до експоненціального зростання. При цьому темпи зростання без гідроенергетики (особливо експоненціальний тренд) значно є вищими, що підкреслює роль вітрової та сонячної енергетики у прискоренні розвитку галузі. Це свідчить, що відновлювана енергетика переживає період швидкого розвитку, особливо завдяки сонячній енергетиці, темпи зростання значно прискорилися після 2018 року, що вказує на зростаючу конкурентоспроможність та привабливість відновлюваних джерел енергії. Гідроенергетика залишається важливим, але відносно стабільним джерелом, тоді як вітрова та особливо сонячна енергетика є основними драйверами зростання. Якщо тренд збережеться, можна очікувати, що у 2024 році потужність перевищить 4100 ГВт. Подальший розвиток відновлюваних джерел енергії буде обумовлений як технологічним прогресом, так і міжнародними зобов'язаннями щодо скорочення викидів вуглецю. Стабільне зростання сукупної потужності свідчить про активну інтеграцію сонячної, вітрової та інших відновлюваних джерел енергії. Це підкреслює важливість інвестицій у сектор, а також актуальність технологічних і політичних ініціатив у галузі «зеленої» енергетики.

Зважаючи на вищенаведені дані, побудуємо прогноз розвитку відновлюваної енергетики (без гідроенергетики) на період 2024–2028 років у світі (рис. 5). Для цього використаємо дані рис. 4, де будуть враховані тенденції останніх років (2010–2023) та програму MS Excel–2016 для побудови прогнозу за допомогою моделі експоненціального згладжування, що найбільш точно відображатиме темпи зростання. Проте, прогнози не враховують можливі зміни в політиці, технологіях, економіці чи інших факторах, які можуть вплинути на розвиток відновлюваної енергетики протягом наступних п'яти років.

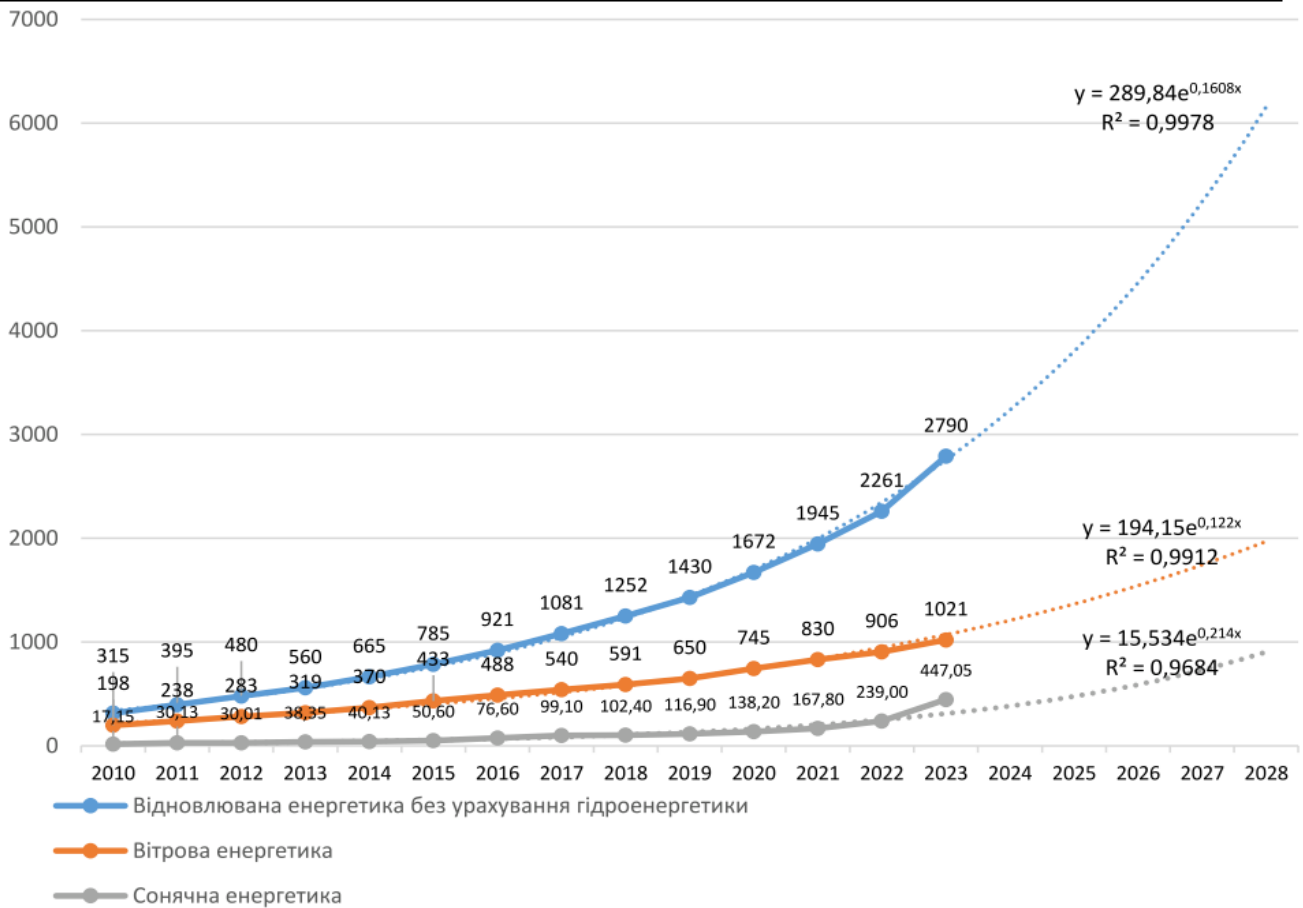


Рис. 5. Прогноз розвитку потужності відновлюваної енергетики у світі у 2024–2028 роках (у гігаватах)

Джерело: побудовано авторами на основі [5; 8]

Для відновлюваної енергетики (без гідроенергетики) модель експоненціального згладжування матиме такий вигляд:

$$Y = 289,84 \cdot e^{0,1608x}$$

$$R^2 = 0,9978$$

Для вітрової енергетики модель експоненціального згладжування матиме такий вигляд:

$$Y = 194,15 \cdot e^{0,122x}$$

$$R^2 = 0,9912$$

Для сонячної енергетики модель експоненціального згладжування матиме такий вигляд:

$$Y = 15,534 \cdot e^{0,214x}$$

$$R^2 = 0,9684$$

Згідно розрахованого прогнозу (рис. 5), до 2028 року загальна потужність відновлюваної енергетики зросте до понад 5238 ГВт. Отримані значення доцільно відобразити у табл. 1.

Таблиця 1

Прогноз розвитку потужності відновлюваної енергетики у світі у 2024–2028 роках (у гігаватах)

Роки	Відновлювана енергетика без урахування гідроенергетики	Вітрова енергетика	Сонячна енергетика
2024	2261	1021	447
2025	2790	1147	539
2026	3441	1290	650
2027	4247	1451	785
2028	5238	1632	948

Джерело: побудовано авторами

Вітрова енергетика розвиватиметься стабільними темпами з тенденцією до зростання. Очікується, що потужність вітрової енергетики зросте до 1632 ГВт у 2028 році, демонструючи щорічний стабільний приріст. Сонячна енергетика розвиватиметься найшвидшими темпами серед

відновлюваних джерел. Загальна потужність ВДЕ до 2028 року може перевищити 5000 ГВт, що вказує на глобальні інвестиції у відновлювану енергетику.

Сучасний розвиток енергетичної галузі свідчить про поступове заміщення традиційної енергетики відновлюваними джерелами енергії. У 2010–2023 роках обсяги введення потужностей ВДЕ перевищили обсяги введення традиційної енергетики, і ця тенденція продовжує зростати. Наприклад, у 2023 році світова сукупна потужність ВДЕ перевищила 4034 ГВт, зокрема, потужність сонячної енергетики досягла 1021 ГВт, а вітрової – 447 ГВт. За прогнозами, до 2028 року ці показники становитимуть понад 5238 ГВт (без урахування гідроенергетики), де головними драйверами залишатимуться вітрова та сонячна енергетика. Це підкреслює зміну пріоритетів у світовій енергетиці, де основний акцент робиться на зменшення викидів CO₂ і розвиток «зеленої» енергетики.

Сьогодні енергетична галузь світу демонструє чітку тенденцію до поступового заміщення традиційної енергетики відновлюваними джерелами енергії. Цей перехід базується на таких ключових аргументах:

1. Зростання частки ВДЕ у світовій енергетиці.
2. Зниження вартості технологій ВДЕ.
3. Інвестиції у ВДЕ.
4. Екологічні та кліматичні зобов'язання урядів країн світу.
5. Стабільне зростання попиту на ВДЕ.

Глобальні виклики, пов'язані зі скороченням викидів вуглекислого газу та зменшенням залежності від викопного палива, стимулюють масштабні інвестиції у відновлювану енергетику та пов'язані з нею технології. У 2023 році інвестори зосередилися на фінансуванні ключових напрямків, які стали основою енергетичного переходу. Нижче представлено детальний аналіз розподілу цих інвестицій за технологіями (рис. 6).

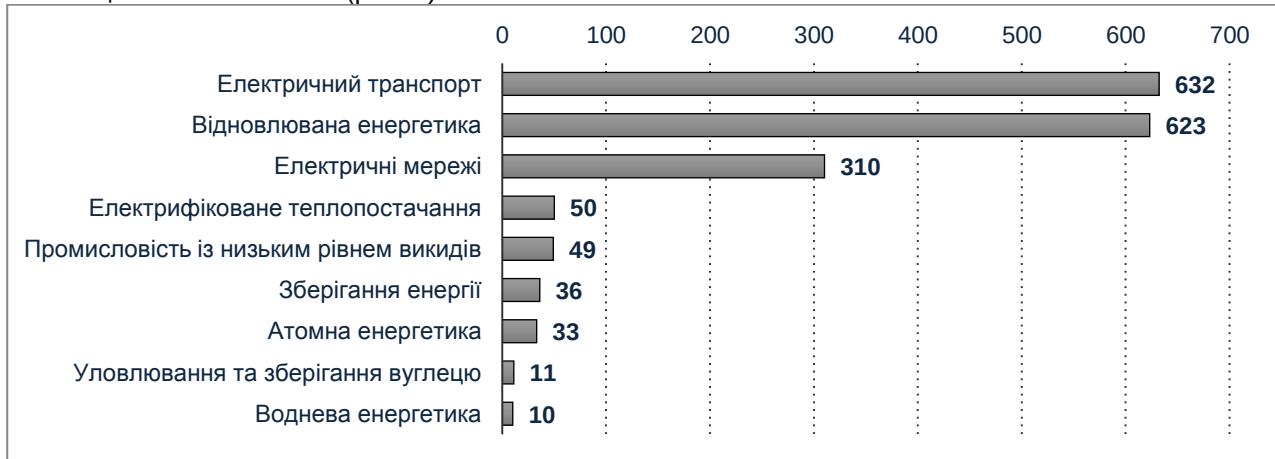


Рис. 6. Інвестиції в енергетичний перехід у світі у 2023 році за технологіями (у млрд доларів США)

Джерело: [5; 7; 8]

Сукупні інвестиції у 2023 році у різні технології енергетичного переходу значно варіюються, що свідчить про різний рівень розвитку цих секторів. Найбільші кошти спрямовано у електричний транспорт та відновлювану енергетику, що підкреслює глобальну орієнтацію на декарбонізацію транспорту та генерації електроенергії. Структура інвестицій в енергетичний перехід у світі в 2023 році за енергетичними технологіями відображена на рис. 7.

Загальний розподіл інвестицій у енергетичний перехід виглядає наступним чином. Так, 36 % усіх світових інвестицій займає електричний транспорт (632 млрд дол. США), такий рівень інвестицій пояснюється зростаючим попитом на електромобілі, розвитком зарядної інфраструктури та акумулятори. Автономні технології та підтримка урядів багатьох країн (субсидії, пільги) сприяють швидкому зростанню цього сектора.

Другий за обсягом напрямок – це відновлювана енергетика 35 % загальних інвестицій або 623 млрд дол. США. Фінансування спрямоване на будівництво гідро-, сонячних і вітрових електростанцій. Зростання обумовлене зниженням вартості технологій і прагненням країн досягти кліматичних цілей.

Інвестиції у модернізацію та розширення мережевої енергетичної інфраструктури для інтеграції відновлюваних джерел енергії займають чисельне місце в загальній структурі (17 % або 310 млрд дол. США).

Інші перелічені сектори на рис. 6–7 отримали відносно менше фінансування, однак вони мають стратегічне значення для сталого енергетичного переходу. Так, частка глобальних інвестицій в електрифіковане тепlopостачання займає біля 2,8 % або 50 млрд дол. США у 2023 році. Фінансування переважно спрямоване на впровадження теплових насосів, що є ключовою технологією для

декарбонізації опалення та гарячого водопостачання промислових об'єктів, багатоквартирних будинків та приватних домогосподарств.



Рис. 7. Структура інвестицій в енергетичний перехід у світі в 2023 році, за технологіями, %

Джерело: складено авторами на основі рис. 6

Інвестиції у новітні технології промисловості з низьким рівнем викидів, які становлять 2,7 % (49 млрд дол. США), спрямовані на розробку та впровадження інновацій для скорочення викидів у важкій промисловості, зокрема в таких галузях, як металургія та цементна промисловість. Зважаючи на амбітні кліматичні цілі, значення цього сектора продовжуватиме зростати. Основний акцент робиться на інтеграцію «зелених» технологій у виробничі процеси, що є ключовим чинником декарбонізації промисловості.

Інвестиції у зберегання енергії становлять 2,2 % (36 млрд дол. США). Незважаючи на відносно невеликий обсяг фінансування, цей сектор має критично важливе значення для забезпечення стабільності енергосистем, заснованих на відновлюваних джерелах енергії. Основна увага приділяється розвитку та впровадженню акумуляторних систем, зокрема батарей великої ємності, які забезпечують надійність і безперервність енергопостачання.

Інвестиції в атомну енергетику становлять 2 % (33 млрд дол. США). Незважаючи на стабільну роль цього сектора у глобальній генерації електроенергії, фінансування залишається відносно помірним через складнощі реалізації окремих проєктів, високі витрати та значний рівень суспільної опозиції через екологічні та безпекові загрози. Водночас, підтримка та розвиток атомних електростанцій є важливою складовою безвуглецевої енергетики, що сприяє досягненню кліматичних цілей.

Уловлювання та зберегання вуглецю (CCS) становить лише 1,4 % інвестицій, що складає 11 млрд дол. США. Хоча ця технологія має значний потенціал для декарбонізації важкої промисловості, її впровадження гальмується високою вартістю та обмеженими можливостями комерційного застосування. CCS є відносно новим напрямком, який може суттєво сприяти скороченню викидів у майбутньому.

Інвестиції у водневу енергетику становлять лише 0,9 % або 10 млрд дол. США, що пояснюється її раннім етапом розвитку. Основна частина фінансування спрямована на розробку «зеленого» водню, який має потенціал замінити викопне паливо у таких секторах, як транспорт, важка промисловість та

енергетика. Ця технологія вважається перспективною для декарбонізації та створення сталих енергетичних рішень у майбутньому.

Отже, у 2023 році пріоритет у світових інвестиціях був наданий секторам, які вже активно розвиваються: електричний транспорт, відновлювана енергетика та енергетична інфраструктура. Разом із цим, інші технології (воднева енергетика, CCS) залишаються недостатньо фінансованими, що може уповільнити їх подальший розвиток. Прискорення енергетичного переходу потребує збільшення інвестицій у перспективні технології, які є необхідними для досягнення кліматичних цілей. У перспективі електричний транспорт і відновлювана енергетика залишатимуться основними напрямками інвестицій до 2030 року, одночасно очікується зростання фінансування водневої енергетики та технологій уловлювання вуглецю через їхню критичну роль у декарбонізації промисловості.

Отже, відновлювані джерела енергії вже зараз формують основу сучасної енергетики, поступово витісняючи традиційні викопні ресурси. Сонячна та вітрова енергетика стають основними драйверами цього процесу, забезпечуючи стабільний економічний розвиток, енергетичну безпеку та екологічну стійкість. Усі ці фактори підтверджують неминучість та важливість переходу до ВДЕ для забезпечення сталого майбутнього.

Висновки з проведеного дослідження. Енергетичний перехід – це еволюційний процес, спрямований на перетворення енергетичних систем зі споживання викопних видів палива на відновлювані джерела енергії, що є ключовим фактором у зменшенні викидів CO₂ та боротьбі з глобальним потеплінням. Декарбонізація енергетичного сектору набуває критичного значення для пом'якшення кліматичних змін і забезпечується завдяки активному розвитку таких джерел, як сонячна, вітрова та інші види відновлюваної енергетики. Енергетичний перехід стає реальністю завдяки впровадженню сучасних технологій, таких як смарт-мережі, діджиталізація енергетичних процесів, а також стимулюючих політик і ринкових механізмів у сфері чистої енергетики. Успішна реалізація цього переходу сприятиме не лише зменшенню вуглецевого сліду, але й створенню нових економічних можливостей, зміцненню енергетичної безпеки та підвищенню конкурентоспроможності відновлюваних джерел енергії.

Такий зсув зумовлений як економічними, так і екологічними факторами. Зниження вартості технологій, зокрема сонячних панелей та вітрових турбін, робить ВДЕ більш конкурентоспроможними у порівнянні з традиційними джерелами енергії. Крім того, посилення міжнародних зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів та прагнення до енергетичної безпеки стимулюють країни до активного переходу на відновлювану енергетику.

Отже, сучасний енергетичний перехід є неминучим і стратегічно важливим процесом, який визначатиме подальший розвиток глобальної економіки. Відновлювані джерела енергії не лише замінюють традиційні, але й відкривають нові можливості для сталого розвитку, створення робочих місць та зменшення негативного впливу на довкілля.

Література

1. Global Energy Transformation. A road to 2050. *IRENA*. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 04.05.2024).
2. BP Statistical Review of World Energy 2021. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (дата звернення: 04.05.2024).
3. Global Energy Review 2021. Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021> (дата звернення: 04.05.2024).
4. Global Electricity Review 2023. *Ember*. URL: <https://ember-energy.org/app/uploads/2024/11/Global-Electricity-Review-2023.pdf> (дата звернення: 04.05.2024).
5. Global renewable energy industry. *Statista*. URL: <https://www.statista.com/outlook/io/energy/renewable-energy/worldwide> (дата звернення: 01.05.2024).
6. Renewable energy statistics. *Eurostat*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics (дата звернення: 02.05.2024).
7. Моїсєєв В. Топ-5 подій у світовій енергетиці у 2023 році: вітер та сонце проти вугілля. URL: https://thepage.ua/ua/economy/top-podij-u-svitovij-energetici-u-2023-roci?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 05.05.2024).
8. Existing renewable energy capacity worldwide including and excluding hydropower from 2008 to 2023 (in gigawatts). *Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/275419/hydropower-and-renewable-energy-worldwide/> (дата звернення: 01.05.2024).

References

1. IRENA (2018), Global Energy Transformation. A road to 2050, available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf?utm_source=chatgpt.com (access date May 04, 2024).
2. BP (2022), BP Statistical Review of World Energy 2021, available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (access date May 04, 2024).
3. Global Energy Review 2021. Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO2 emissions in 2021, available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021> (access date May 04, 2024).
4. Ember (2024), Global Electricity Review 2023, available at: <https://ember-energy.org/app/uploads/2024/11/Global-Electricity-Review-2023.pdf> (access date May 04, 2024).
5. Statista (2024), Global renewable energy industry, available at: <https://www.statista.com/outlook/io/energy/renewable-energy/worldwide> (access date May 01, 2024).
6. Eurostat (2024), Renewable energy statistics, available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics (access date May 02, 2024).
7. Moisieiev, V. (2023), "Top 5 events in the global energy sector in 2023: wind and solar vs. coal", available at: https://thepage.ua/ua/economy/top-podij-u-svitovij-energetici-u-2023-roc?utm_source=chatgpt.com (access date May 05, 2024).
8. Statista (2024), Existing renewable energy capacity worldwide including and excluding hydropower from 2008 to 2023 (in gigawatts), available at: <https://www.statista.com/statistics/275419/hydropower-and-renewable-energy-worldwide/> (access date May 01, 2024).

Пуцентейло П.Р., Брич В.Я., Бруханський Р.Ф., Домбровська Н.Р.

РОЗВИТОК ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ: ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ТА СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ГЛОБАЛЬНИХ ТЕНДЕНЦІЙ

Мета. Аналітичне дослідження розвитку відновлюваних джерел енергії: економічні аспекти виробництва, статистичний аналіз глобальних тенденцій, визначення ключових чинників, що впливають на динаміку сектору, та оцінювання перспектив його розвитку у контексті світових зусиль із декарбонізації та переходу до сталого енергетичного майбутнього.

Методика дослідження. Методологічною основою дослідження є діалектичний метод наукового пізнання та системний підхід. В процесі дослідження використано комплекс наукових методів, що забезпечують аналіз розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема: аналізу і синтезу, аналітичний – при опрацюванні літературних та Internet-джерел; статистичний аналіз – для оцінювання динаміки розвитку ВДЕ на основі історичних даних, проведення оцінювання глобальних тенденцій та визначення ключових напрямків у впровадженні ВДЕ, виконання порівняння обсягів виробництва електроенергії з різних джерел (сонячна, вітрова енергетика тощо) для оцінювання динаміки їх розвитку. Економічний аналіз застосовано для оцінювання впливу інвестицій в енергетичні технології. Застосування трендового аналізу дало змогу ідентифікувати основні чинники впливу на розвиток ВДЕ, здійснити прогноз розвитку ВДЕ. Графічний метод застосовано для візуалізації статистичних даних і трендів, що забезпечує більш наочне представлення динаміки розвитку ВДЕ та спрощує інтерпретацію отриманих результатів.

Результати дослідження. Досліджено питання сутності, структури та особливостей функціонування ВДЕ в світі; конкретизовано основні аспекти, що забезпечують їх формування. Розглянуто особливості змісту ВДЕ, визначено особливості їх складових задля досягнення енергетичної безпеки. Проведено аналіз глобальних тенденцій та визначено ключові напрямки, що лідирують у впровадженні ВДЕ. Виконано порівняння обсягів виробництва електроенергії із різних джерел (сонячна, вітрова енергетика тощо) для оцінювання динаміки їх розвитку.

Наукова новизна результатів дослідження. Набуло подальшого розвитку прогнозування потужностей використання відновлюваних джерел енергетики у світі на 2024–2028 роки за рахунок експоненціального згладжування, що дало змогу провести комплексний і багатосторонній аналіз розвитку відновлюваної енергетики, виявити ключові економічні аспекти виробництва, визначити глобальні тенденції, а також запропонувати рекомендації для подальшого зростання сектору у світовому масштабі.

Практична значущість результатів дослідження. Обґрунтовані результати дослідження можуть бути використані для оцінювання тенденцій розвитку ВДЕ на 2024–2028 роки для визначення пріоритетів інвестування.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, енергетичний перехід, вітрова енергетика, сонячна енергетика, біоенергетика, традиційна енергетика, інвестиції.

Putsenteilo P.R., Brych V.Ya., Brukhanskyi R.F., Dombrovska N.R.

DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES: ECONOMIC ASPECTS OF PRODUCTION AND STATISTICAL ANALYSIS OF GLOBAL TRENDS

Purpose. The aim of the article is to analyse the development of renewable energy sources: economic aspects of production, statistical analysis of global trends, identification of key factors affecting the dynamics of the sector, and assessment of the prospects for its development in the context of global efforts to decarbonize and transition to a sustainable energy future.

Methodology of research. The methodological basis of the study is the dialectical method of scientific cognition and a systematic approach. In the course of the study, a set of scientific methods was used to analyse the development of renewable energy sources, including analysis and synthesis, analytical methods were used when processing literature and Internet sources; statistical analysis was used to assess the dynamics of renewable energy development based on historical data, to assess global trends and identify key areas for the implementation of renewable energy sources, to compare the volume of electricity production from different sources (solar, wind energy, etc.) to assess the dynamics of their development. Economic analysis was used to assess the impact of investments in energy technologies. Trend analysis was used to identify the main factors influencing the development of renewable energy sources and to forecast the development of renewable energy sources. The graphical method was used to visualize statistical data and trends, which provides a more visual representation of the dynamics of RES development and simplifies the interpretation of the results.

Findings. The essence, structure and peculiarities of the functioning of RES in the world are investigated; the main aspects that ensure their formation are specified. The peculiarities of the content of RES are considered, the peculiarities of their components are determined in order to achieve energy security. Global trends are analysed and key areas leading in the implementation of RES are identified. The volumes of electricity production from different sources (solar, wind energy, etc.) are compared to assess the dynamics of their development.

Originality. The forecasting of renewable energy capacities in the world for 2024-2028 was further developed through exponential smoothing, which made it possible to conduct a comprehensive and multilateral analysis of renewable energy development, identify key economic aspects of production, determine global trends, and offer recommendations for further growth of the sector on a global scale.

Practical value. The study made it possible to provide a comprehensive and multilateral analysis of the development of renewable energy, identify key economic aspects of production, determine global trends, and offer recommendations for further growth of the sector on a global scale. The study's findings can be used to assess renewable energy development trends for 2024-2028 and to determine investment priorities.

Key words: renewable energy sources, energy transition, wind energy, solar energy, bioenergy, traditional energy, investments.