

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-55-83>

УДК 338.45:621.548(477)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СВІТІ

STUDY OF THE EFFICIENCY AND PERSPECTIVES OF THE DEVELOPMENT OF WIND ENERGY IN THE WORLD

Байдала Вікторія Володимирівнадоктор економічних наук, професор,
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1532-2913>**Нагорний Віталій Володимирович**кандидат економічних наук, доцент,
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5551-4779>**Baidala Viktoriia, Nahorni Vitalii**

National University of Life and Environmental Sciences

Стаття присвячена актуальним питанням ефективності та перспективам розвитку вітрової енергетики. Проаналізовано світовий досвід переходу до відновлюваної енергії. Визначено, що станом на кінець 2022 року найдешевшим видом відновлюваної енергетики є саме вітрова енергетика. До ТОП 7 країн – лідерів розвитку вітрової енергетики у світі входять Китай та Індія (Азія); Німеччина, Іспанія та Велика Британія (Європа); США (Північна Америка) та Бразилія (Південна та Центральна Америка). Досліджено, що факторами, які мають суттєвий вплив на розвиток відновлюваної енергетики у вказаних країнах, є рівень економічного розвитку країни, попит на електроенергію, а також вартість генерації електроенергії з ВЕС. Найбільший вплив на розвиток відновлюваної енергетики має саме попит на електроенергію. При збільшенні попиту на електроенергію на 1 ТВт*год відбувається збільшення генерації електроенергії з ВЕС на 0,073 ТВт*год.

Ключові слова: альтернативне енергозабезпечення, відновлювана енергія, вітрова енергетика, фактори розвитку вітрової енергетики, економічна ефективність альтернативної енергетики.

The article is devoted to topical issues of efficiency and prospects for the development of wind energy. In the modern world, the issue of energy supply is crucial, taking into account the exhaustion of traditional sources, such as oil, gas, coal. The transition to alternative energy supply is vital for the vast majority of countries in the world. The article examines the global experience of wind energy development. The main advantage of wind energy over traditional sources of energy is the ecological component. There is zero emission of polluting substances in the process of generating electricity from wind power plants. The purpose of the article is research and analysis of factors that affect the economic efficiency and development of wind energy, based on the experience of countries that hold leadership positions in this field. The such general scientific methods as analysis and synthesis, the comparison method, as well as the correlation-regression method, modeling of panel data in the Rstudio program were used in the research process. The world experience of the transition to renewable energy is analyzed. It was determined that as of the end of 2022, wind power is the cheapest type of renewable energy. The TOP 7 countries - leaders in the development of wind energy in the world include China and India (Asia); Germany, Spain and Great Britain (Europe); USA (North America) and Brazil (South and Central America). It has been investigated that the factors that have a significant impact on the development of renewable energy in the specified countries are the level of economic development of the country, the demand for electricity, as well as the cost of electricity generation from wind turbines. Demand for electricity has the greatest impact on the development of renewable energy. When the demand for electricity increases by 1 TWh, the generation of electricity from wind power plants increases by 0.073 TWh. The practical significance of the research is the definition of the main factors that determine the development and economic efficiency of wind energy. These factors include the level of economic development of the country, the demand for electricity and the reduced cost of electricity generation from wind power plants.

Keywords: alternative energy supply, renewable energy, wind energy, wind energy development factors, economic efficiency of alternative energy.



Постановка проблеми. На сьогоднішній момент вітрова енергетика є одним з найбільш популярних видів відновлюваної енергетики у світі. Основна перевага вітрової енергетики над традиційними джерелами енергії полягає саме у екологічній складовій – в процесі генерації електроенергії з вітрових електростанцій відбувається нульовий викид забруднюючих речовин, зокрема діоксиду вуглецю [1]. Крім того, вітрова енергетика має значні переваги і над іншими видами відновлюваної енергетики, зокрема сонячної енергетики, оскільки оптимальне географічне розташування та встановлення генеруючих установок дає змогу генерувати електроенергію протягом всієї доби, чого не можна сказати про сонячну енергетику, генерація електроенергії якої припиняється з настанням темної пори доби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питаннями розвитку вітрової енергетики у світі займалась значна кількість зарубіжних науковців. Так, наприклад, Пол Вірс та Кетрін Дайкс доводять, що енергія вітру відіграватиме центральну роль у забезпеченні швидкого переходу від використання викопного палива до енергетичного сектору, який базується переважно на джерелах відновлюваною енергії [6]. Однак, для реалізації такої трансформації енергетичного сектору необхідно вирішити критичні проблеми, пов'язані з проектуванням, розробкою та розгортанням наземних і морських технологій вітрової енергетики. Олівер Саммерфілд-Райан в своїх роботах доводить, що глобальний перехід до відновлюваної енергії є обов'язковим для запобігання катастрофічній зміні клімату, а вітрова енергетика відіграє провідну роль у досягненні цілей щодо скорочення викидів відповідно до Паризької угоди 2015 року. Вітрова енергія є однією з найшвидше зростаючих, найбільш конкурентоспроможних і найменш шкідливих технологій відновлюваної енергії. Використовуючи підхід оригінальної інституційної економіки (OIE) для вивчення подій у реальному світі, ми стверджуємо, що глобальна вітроенергетична галузь стає все більш нестабільною та концентрованою, що має наслідки для майбутнього зростання та траєкторії декарбонізації [5]. Науковець доводить, що вітрова енергетика працює в рамках ринків електроенергії «першого покоління», які віддають перевагу традиційній енергії. В подальшому це може зменшити необхідні інвестиції у вітрову енергетику. Махфуз Кабір в своїх роботах говорить про те, що вітрова

енергетика має багато екологічних та соціально-економічних переваг, таких як: зменшення викидів парникових газів, позитивний вплив на здоров'я населення та збільшення можливостей з працевлаштування [4]. Багато країн, які розвиваються та мають високу щільністю вітру активно встановлюють вітрові турбіни. Уряди таких країн використовують енергію вітру для покращення енергетичної матриці. Проте існують деякі недоліки вітрової енергії, такі як загибель птахів і кажанів, шумове забруднення, візуальні ефекти, негативний вплив на морську рибу та ссавців, а також негативні наслідки для наземної екосистеми. Для розвитку вітрової енергетики серед країнах, які розвиваються необхідно досягнути ефекту масштабу у виробництві генеруючих установок, мінімізувати небезпеки для навколишнього середовища та залучити більшу громадську підтримку вітрової енергетики. Різвана Ясмін використовував кубічну форму доходу для пояснення ефекту масштабу вітрової енергетики [8]. Дослідження оцінює посередницький ефект доходу та іноземних інвестицій для стимулювання споживання вітрової енергетики та скорочення забруднюючих викидів енергетичного сектору. У своїх дослідженнях Різвана Ясмін доводить, що приріст потужності вітрової енергетики являється похідним від економічного росту країни. Результати показують перевернуту N-подібну криву між доходом та споживанням вітрової енергії. Модель викидів вуглецю показує N-подібну екологічну криву Кузнеця. Науковець доводить, що енергетична політика країни, яка спрямована на прискорення переходу від викопного палива до відновлюваних джерел, має значний вплив на рівень виробництва та споживання вітрової енергії.

Крістофер Юнг доводить, що розвиток берегової вітрової енергетики різниться в усьому світі, що часто виражається встановленою потужністю та коефіцієнтом потужності вітрової енергетики [2]. Однак, встановлена потужність і коефіцієнт потужності не дозволяють зробити висновки про те, наскільки ефективно та результативно країни використовують свій потенціал для розвитку вітрової енергетики. Невідомо, наскільки далеко йде розширення вітрової енергетики і чи найкращим чином країни використовують наявний потенціал. Ефективність використання вітрової енергетики розраховувалась шляхом порівняння розподілів індексу потенціалу окремих ВЕС з розподілами індексу потенціалу ВЕС країни у цілому за статистикою тесту

Колмогорова-Смирнова. Співвідношення потужності до придатної для використання площі дозволяє розрахувати ефективність використання вітрового потенціалу. Результати показують, що 81,9% встановлених берегових вітряних турбін у світі працюють у оптимально розташованих місцях. Одночасних проявів високої ефективності немає в жодній країні: Китай, Бразилія та Італія використовують свій вітровий потенціал ефективніше, ніж багато інших країн. США та Індія адекватно враховують ефективність вітрових ресурсів для розміщення вітрових турбін. Дослідник доводить наскільки важливо кількісно оцінити розвиток вітроенергетики на основі визначення її ефективності та не використовували для аналізу лише встановлену потужність та коефіцієнти потужності вітрової енергетики.

Водночас, слід зазначити, що питання забезпечення розвитку та економічної ефективності вітрової енергетики наразі залишаються об'єктом постійного вивчення, оскільки саме вітрова енергетика має значні переваги над іншими видами відновлюваної енергії. Відтак, є об'єктивна необхідність подальших досліджень в даній галузі для розв'язання задач забезпечення економічної ефективності вітрової енергетики.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження та аналіз факторів, які впливають на економічну ефективність та розвиток вітрової енергетики, спираючись на досвід країн, що посідають лідерські позиції в даній галузі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як відомо, вітрова енергетика є одним із самих популярних джерел відновлюваної енергії у світі, а саме займає другу позицію за своєю значимістю після сонячної

енергетики. Прогрес розвитку вітрової енергетики можна визначити на базі показника динаміки генерації електроенергії з вітрових електростанцій (ВЕС). Як можна побачити з рис. 1 динаміку генерації електроенергії з ВЕС у світі найкраще апроксимує експоненційний тренд (коефіцієнт детермінації 98%) з показником щорічного приросту на рівні в 21%. До 2002 року глобальний обсяг генерації електроенергії з ВЕС знаходився максимально наближено до нульової відмітки, починаючи з 2003 року середній щорічний приріст генерації складав 69 ТВт.*год. електроенергії, а на кінець 2022 року глобальний обсяг генерації електроенергії з ВЕС складає більше 2 тис. ТВт.*год.

При аналізі генерації електроенергії з ВЕС серед різних регіонів світу – можна побачити трьох основних лідерів, а саме: Азію, Європу та Північну Америку (рис. 2). Динаміку розвитку вітрової енергетики серед всіх трьох зазначених регіонів найкраще апроксимує експоненційний тренд, наприклад, коефіцієнт детермінації відповідного тренду для Азії складає 98%, а для Північної Америки 97%. Щорічний темп приросту генерації електроенергії з ВЕС для Азії складає 28%, тоді як Північної Америки 22%. На кінець 2022 року сумарна генерація електроенергії з ВЕС для Європи та Північної Америки знаходилась на рівні генерації Азії, проте аналіз наявних часових рядів даних показує, що з 1995 до 2016 року абсолютним лідером, як за обсягами генерації електроенергії з ВЕС так і за темпами щорічного приросту являлась Європа. Розвиток вітрової енергії серед Північної Америки та Азії почався в один і той самий часовий період, а саме 2007–2008 роки, однак з 2016 року Азія суттєво збільшила

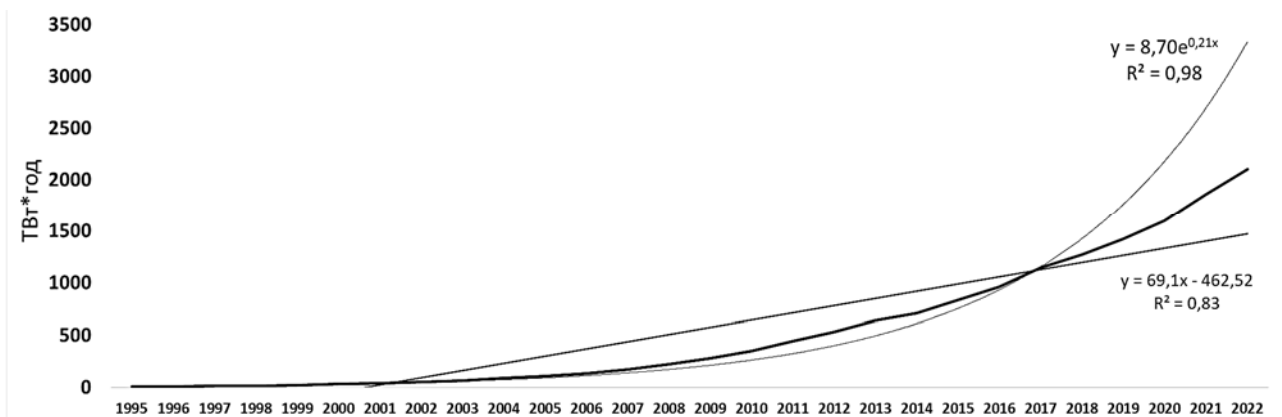


Рис. 1. Динаміка генерації електроенергії з ВЕС у світі

Джерело [9]

обсяги генерації, що до 2022 року вивело її в абсолютній світові лідери з розвитку вітрової енергії.

Звичайно, розвиток вітрової енергетики серед країн Азії більшою мірою є результатом необхідності задоволенні власних енергетичних потреб, які з кожним роком збільшуються, тоді як розвиток вітрової енергетики серед країн Північної Америки та Європи пояснюється впровадженням програм збереження навколишнього середовища та посиленого розвитку технологій відновлюваної енергетики.

Не дивлячись на те, що Азія є найбільшим виробником електроенергії з ВЕС, вона посідає одне з останніх місць за показником генерації електроенергії з ВЕС на особу населення (рис. 3). Як уже зазначалось, такий парадокс

пояснюється бажанням задовольнити великі енергетичні потреби регіону та великим числом його населення. Незважаючи на те, що за абсолютним значенням цього показника Азія посідає одне з останніх місць в світовому рейтингу, темпи його щорічного приросту залишаються одними з найбільших (27,4%).

Для порівняння Північна Америка, яка є лідером за генерацією електроенергії з ВЕС на душу населення, має щорічний приріст даного показника лише на рівні 20% (подібна ситуація спостерігається і в Європі).

Варто відзначити, що Океанія, яка має один з найменших рівнів розвитку вітрової енергетики, має друге місце у світі за рівнем генерації електроенергії з ВЕС на душу населення. Даний феномен можна пояснити обмеженням

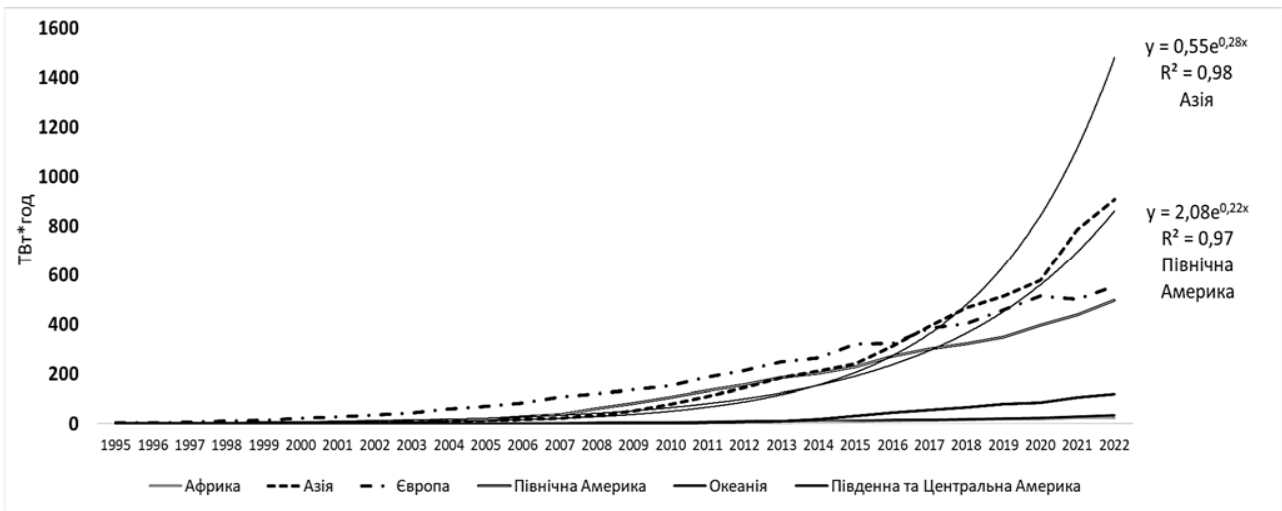


Рис. 2. Динаміка генерації електроенергії з ВЕС серед різних регіонів світу

Джерело [9]

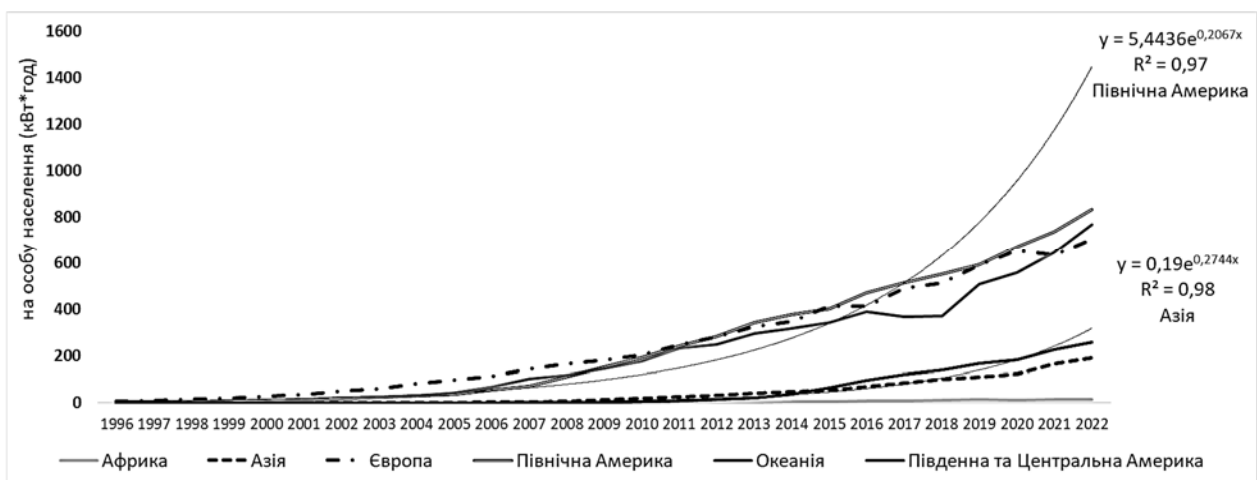


Рис. 3. Динаміка генерації електроенергії з вітрової енергетики на особу населення серед різних регіонів світу

Джерело [7]

доступом мешканців цього регіону до традиційних джерел енергії, а також географічними особливостями, які дозволяють населенню широко використовувати технології вітрової енергетики.

Поглиблений аналіз розвитку вітрової енергетики у світі, а саме оцінка обсягів генерації електроенергії з ВЕС кожної з країн показує, що з 2002 до 2022 року не менше 75% всієї світової генерації припадало на ТОП 7 країн. Крім цього, склад ТОП 7 країн за останні 20 років не змінився, у 2002 році на ці країни припадало 76% світової генерації, у 2012 році 75%, а у 2022 уже 77%. До складу зазначених країн входять Китай та Індія (Азія); Німеччина, Іспанія та Велика Британія (Європа); США (Північна Америка) та Бразилія (Південна та Центральна Америка).

У 2012 році (рис. 4) абсолютним лідером з розвитку вітрової енергетики були США, які генерували до 142 ТВт*год електроенергії, друге місце посідав Китай з обсягом генерації електроенергії в 103 ТВт*год, третє місце займали Німеччина та Іспанія (кожна з країн генерувала в середньому 50 ТВт*год електроенергії).

Слід підкреслити, що Німеччина та Іспанія, населення яких складає 90 та 47 млн. осіб відповідно, генерували стільки ж енергії, як Китай з населенням більше 1,3 млрд. осіб.

Протягом 10 останніх років кожна з ТОП 7 країн збільшила обсяги генерації електроенергії з ВЕС (рис. 5). Найбільший приріст (в 16,4 рази) припав на Бразилію, яка збільшила обсяги генерації з 5 ТВт*год в 2012 році

до 82 ТВт*год в 2022 році. Звичайно, такий колосальний приріст в Бразилії пояснюється низькою порівняльною базою 2012 року, враховуючи це, приріст Китаю (в 7,4 рази) є набагато більшим результатом, оскільки в 2012 році Китай уже мав друге місце в світі за розвитком вітрової енергетики, що говорить про технологічний та економічний розвиток даної країни, оскільки чисельність населення кардинально не змінилась. Дещо менший приріст демонструють США (в 3,1 рази) та Німеччина (в 2,6 рази). Таким чином, можна говорити, що на кінець 2022 року Китай генерує 35% всієї світової генерації електроенергії з ВЕС.

Розвиток відновлюваної енергетики, а саме збільшення обсягів генерації електроенергії з відновлюваних джерел енергії, нерозривно пов'язаний із збільшенням інвестицій у відповідні технології. З рис. 6 можна побачити, що з 2004 до 2010 року вітрова енергетика за обсягами інвестицій випереджала сонячну енергетику. У період з 2011 до 2018 року обсяги інвестицій у сонячну енергетику були суттєво більші. На кінець 2022 року річний обсяг інвестицій у сонячну енергетику складає близько 300 млрд. дол. США, тоді як у вітрову енергетику, близько 180 млрд. дол. США. Сонячна енергетика випереджає вітрову також і за щорічними середніми темпами приросту. Для сонячної енергетики даний показник складає 12,36 млрд. дол. США, тоді як для вітрової 8,66 млрд. дол. США. Переважання інвестицій сонячної енергетики над вітровою пояснюється привабливістю самих техноло-

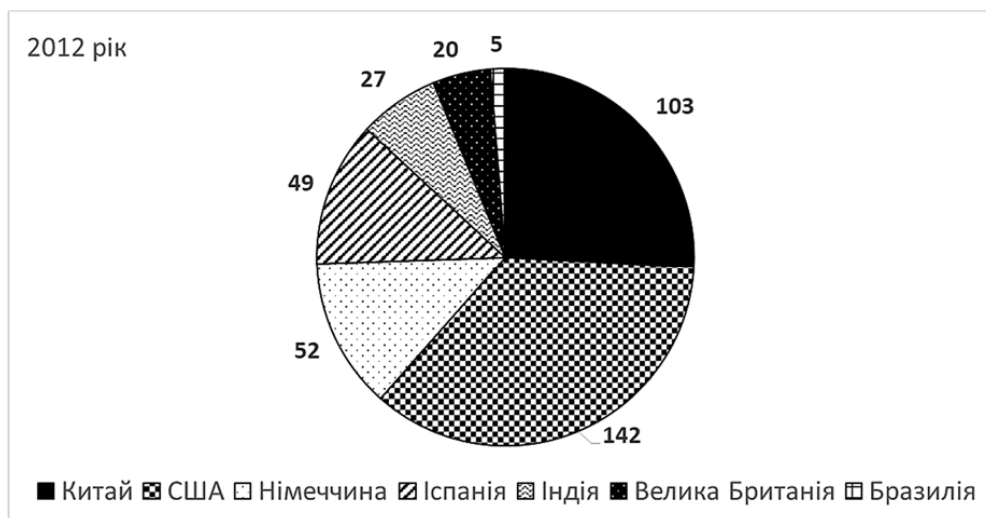


Рис. 4. Обсяги генерації електроенергії з ВЕС (ТВт*год) серед ТОП 7 країн – лідерів розвитку вітрової енергетики у світі в 2012 році

Джерело [9]

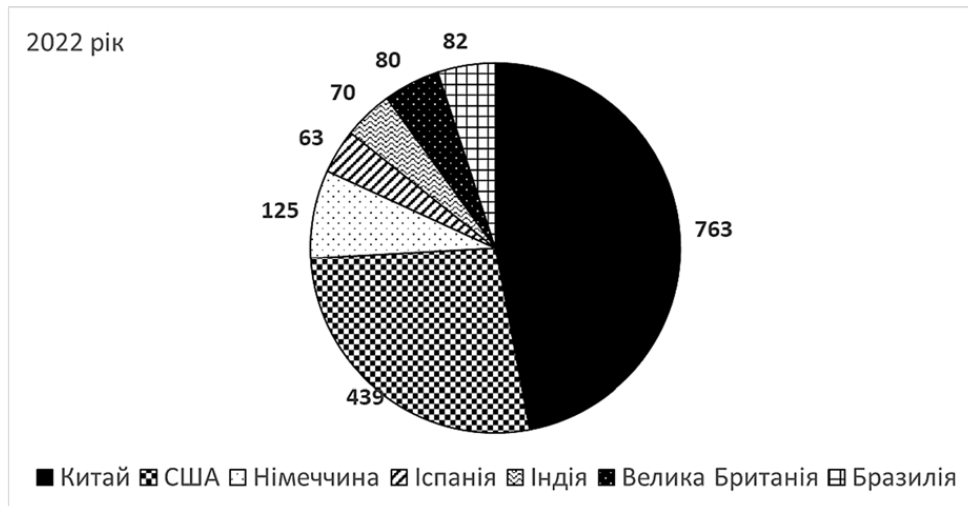


Рис. 5. Обсяги генерації електроенергії з ВЕС (ТВт*год) серед ТОП 7 країн – лідерів розвитку вітрової енергетики у світі в 2022 році
Джерело [9]

гій, зокрема сонячна енергетика може використовуватись на рівні будь-якого суб'єкта економіки, оскільки відсутнє обмеження на мінімально допустиму потужність генеруючої установки та наявна можливість поступового збільшення потужності генеруючої установки. Крім цього, для сонячної енергетики відсутні будь-які побічні звуки під час генерації електроенергії, а також нульова ймовірність руйнації генеруючої установки під час пікових навантажень.

Однак, не дивлячись на всі недоліки вітрової енергетики в порівнянні з сонячною, вона залишається другим типом відновлюваної енергетики у світі за рівнем та темпами розвитку. Всі інші види відновлюваної енергетики за обсягами залучених інвестицій з 2004 року демонструють тренд до стагнації, зокрема, в середньому кожного року відбувається зменшення обсягу інвестицій на 1,5 млрд. дол. США.

Збільшення обсягу інвестицій у відновлювану енергетику, що зумовлює нарощування обсягів генерації електроенергії з відновлюваних джерел, пояснюється не тільки бажанням урядів багатьох країн світу забезпечити цілі сталого розвитку або забезпечити власні енергетичні потреби, але ще й зменшенням собівартості технологій відновлюваної енергетики, які найкраще виражаються показником приведеної вартості виробництва електроенергії (рис. 7). З 2010 до 2022 року приведена вартість виробництва електроенергії з ВЕС апроксимується лінійним трендом (коефіцієнт детермінації 99%), відповідно до якого кожного року собівартість вітрової енергетики для

інвестора зменшується на 0,0065 дол. США. Звичайно, для сонячної енергетики щорічні темпи зменшення собівартості технологій значно більші та складають 0,0292 дол. США, але при цьому потрібно враховувати, що початкова база порівняння для сонячної енергетики була значно більша за всі наявні технології відновлюваної енергетики. Так, в 2010 році собівартість 1 кВт*год електроенергії з СЕС складала 0,4 дол. США, тоді як для вітрової енергетики цей показник складав 0,1 дол. США.

На кінець 2022 року найдешевшим видом відновлюваної енергетики є саме вітрова енергетика (на рівні 0,04 дол. США за 1 кВт*год електроенергії). Потрібно зазначити, що стагнація інших видів відновлюваної енергетики (зокрема, зменшення обсягів залучених інвестицій) пов'язана не тільки із проблемами встановлення генеруючих установок та забезпечення їх оптимальної операційної діяльності, але ще й відсутності їх технологічного розвитку. Для прикладу, приведена вартість виробництва електроенергії для біоенергетики з 2010 до 2021 року взагалі не змінилась та не демонструвала будь-якого тренду до зменшення.

Очевидно, розвиток технологій відновлюваної енергетики, який найкраще прослідковується у зменшенні приведеної вартості виробництва електроенергії, не може бути єдиним фактором розвитку відновлюваної енергетики у світі.

В пошуках факторів, які пояснюють розвиток вітрової енергетики у світі, розглянемо

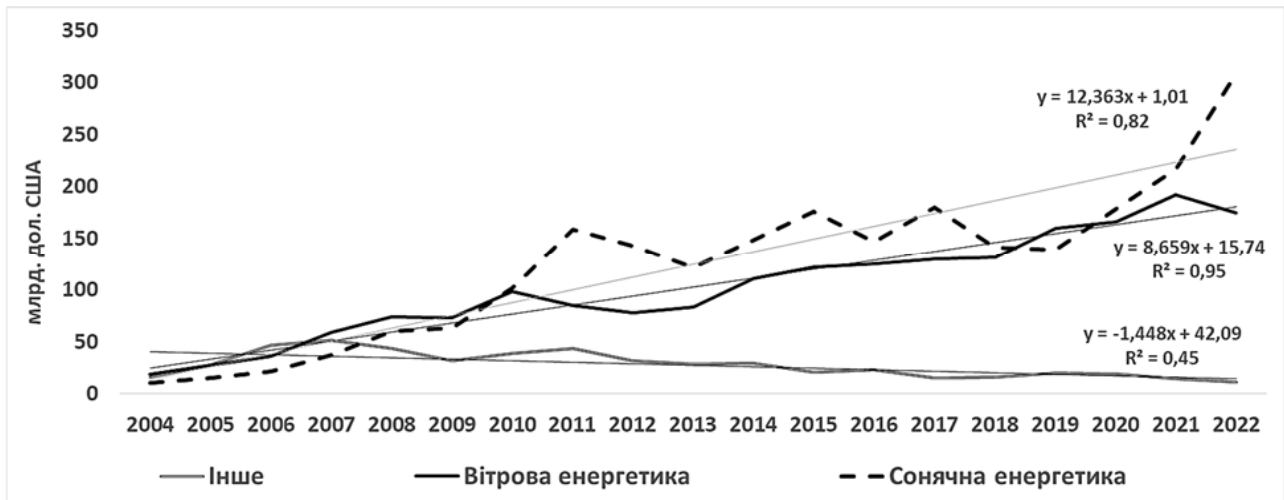


Рис. 6. Інвестиції у відновлювану енергетику у світі

Джерело [3]

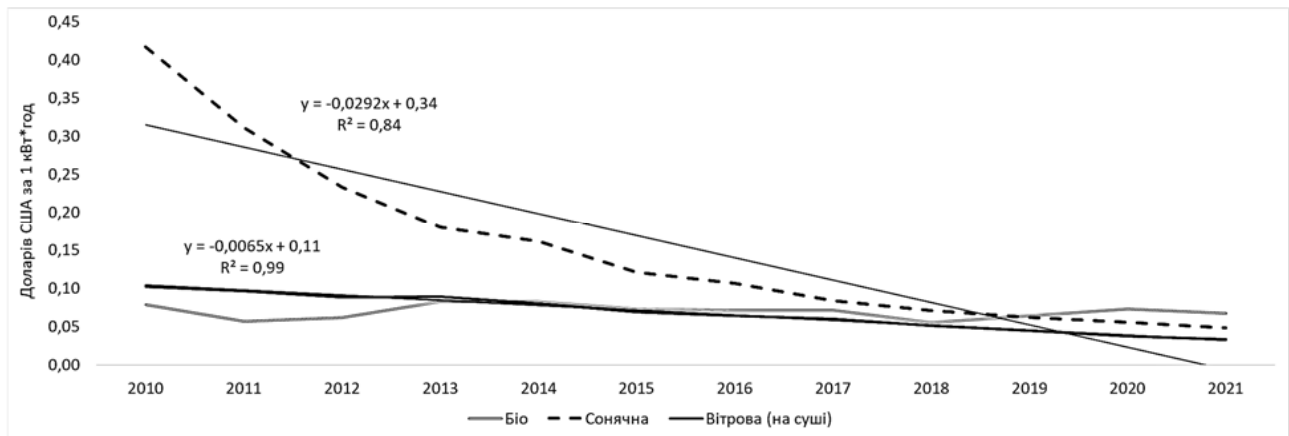


Рис. 7. Приведена вартість виробництва електроенергії з різних джерел відновлюваної енергії

Джерело [10]

кореляційну залежність розвитку вітрової енергетики від таких показників, як валовий внутрішній продукт (ВВП) на душу населення, попит на електроенергію та приведена вартість вітрової енергії серед ТОП 7 країн лідерів розвитку вітрової енергетики у світі, які на кінець 2022 року генерували більше 77% всієї електроенергії з ВЕС. З табл. 1 можна побачити, що для 5-ти з ТОП 7 країн (крім Бразилії та Великої Британії) коефіцієнт кореляції між обсягом генерації електроенергії з ВЕС та ВВП на душу населення складає 67% і більше на рівні значимості менше 0,001, що говорить про суттєвий вплив економічного розвитку країни на розвиток відновлюваної енергетики.

Кореляційний аналіз підтверджує також наявність позитивного впливу фактору попиту на електроенергію в стимулюванні розвитку вітрової енергетики серед ТОП 7 країн.

Виключенням з цього аналізу є Німеччина та Велика Британія, які мають від'ємне значення відповідного коефіцієнта кореляції. Такий феномен може пояснюватись за рахунок різних стрибків попиту на електроенергію, які не могли задовольнятися різким збільшенням генерації електроенергії з ВЕС.

Також для підтвердження позитивного впливу зменшення собівартості технологій на обсяги генерації електроенергії з ВЕС розглянемо кореляційну залежність між обсягом генерації вітрової енергії та приведеною вартістю вітрової енергії. Розраховані коефіцієнти кореляції для ТОП 7 країн лідерів розвитку вітрової енергетики у світі знаходяться на рівні від -64% до -96% при рівні значимості менше 0,001.

Враховуючи той факт, що з 2012 до 2022 року склад ТОП 7 країн – лідерів роз-

Таблиця 1

Кореляційна залежність розвитку вітрової енергетики від ВВП на душу населення, попиту на електроенергію та приведеної вартості вітрової енергії серед ТОП 7 країн – лідерів розвитку вітрової енергетики у світі

	Бразилія	Китай	Німеччина	Іспанія	Велика Британія	Індія	США
Коефіцієнт кореляції між обсягом генерації вітрової енергії та ВВП на особу населення	0,20	0,93***	0,76***	0,67***	0,40*	0,97***	0,97***
Коефіцієнт кореляції між обсягом генерації вітрової енергії та попитом на електроенергію	0,80***	0,91***	-0,66***	0,45*	-0,97***	0,99***	0,73***
Коефіцієнт кореляції між обсягом генерації вітрової енергії та приведеною вартістю вітрової енергії	-0,85***	-0,82***	-0,96***	-0,64**	-0,91***	-0,9***	-0,86***

Рівні значимості: 0 '***' 0.001 '***' 0.01 '*' 0.1 ' ' 1

Джерело: власні розрахунки

витку вітрової енергетики не змінився, а їх сумарна частка у світовій генерації електроенергії з ВЕС складала не менше 70%, визначимо маржинальний вплив таких факторів, як рівень економічного розвитку, попит на електроенергію та приведена вартість генерації електроенергії для ВЕС на обсяг генерації електроенергії з ВЕС саме на базі розглянутих ТОП 7 країн (табл. 2).

Таблиця 2

Коди нульових членів панельної регресійної залежності розвитку вітрової енергетики від попиту на електроенергію, рівня економічного розвитку та приведеної вартості енергії серед ТОП 7 країн – лідерів розвитку вітрової енергетики

Назва країни	Код країни для панельної регресії
Бразилія	1
Китай	2
Німеччина	3
Іспанія	4
Велика Британія	5
Індія	6
США	7

Джерело: власні розрахунки

Для досягнення поставленої задачі використаємо панельну регресію, що враховує як

часову та просторову компоненту. Залежною змінною (y) в даній моделі виступає обсяг річної генерації електроенергії з ВЕС у ТВт*год. Пояснюючими змінними (x, p та q) виступають відповідно:

- річний ВВП на особу населення, дол. США;
- річний попит на електроенергію, ТВт*год;
- приведена вартість генерації електроенергії з ВЕС, дол. США за 1 кВт.*год.

Розрахована панельна регресія пояснює більше 77% варіації залежної змінної (рис. 8). Маржинальні коефіцієнти для таких незалежних змінних, як річний ВВП на душу населення та річний попит на електроенергію є адекватними відповідно до t-критерію Стьюдента на рівні значимості менше 0,001. Маржинальний коефіцієнт для фактору приведеної вартості електроенергії, також є адекватним відповідно до t-критерію Стьюдента, але на рівні значимості менше 12%.

Найбільший вплив на розвиток відновлюваної енергетики має саме попит на електроенергію. При збільшенні попиту на електроенергію на 1 ТВт*год відбувається збільшення генерації електроенергії з ВЕС на 0,073 ТВт*год (таким чином, кожна додаткова одиниця попиту на електроенергію задовольняється лише на 7,3% за рахунок вітрової енергетики). Досить суттєвий вплив на розвиток вітрової енергетики, також має і економіч-


```

oneway (individual) effect within Model

Call:
plm(formula = y ~ x + p + q, data = panel_data, effect = "individual",
     model = "within")

Balanced Panel: n = 7, T = 23, N = 161

Residuals:
    Min.   1st Qu.   Median   3rd Qu.    Max.
-106.6405 -23.9787  -1.8598  19.3487  232.3839

Coefficients:
      Estimate Std. Error t-value Pr(>|t|)
x  6.0663e-03  7.2736e-04  8.3403 4.294e-14 ***
p  7.3049e-02  4.8649e-03 15.0156 < 2.2e-16 ***
q -2.0800e+02  1.3246e+02 -1.5702  0.1185
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares:  1574900
Residual Sum of Squares: 356960
R-Squared: 0.77334
Adj. R-Squared: 0.75983
F-statistic: 171.733 on 3 and 151 DF, p-value: < 2.22e-16

```

Рис. 8. Результати розрахунку залежності розвитку вітрової енергетики від рівня економічного розвитку, попиту на електроенергію та приведеної вартості електроенергії серед ТОП 7 країн – лідерів розвитку вітрової енергетики у світі за допомогою панельної регресії в Rstudio

Джерело: власні розрахунки

```

      Estimate Std. Error t-value Pr(>|t|)
1  -50.785    18.273  -2.7792  0.006142 **
2  -185.428   31.169  -5.9492  1.805e-08 ***
3  -203.117   41.208  -4.9291  2.151e-06 ***
4  -128.747   29.058  -4.4307  1.795e-05 ***
5  -229.006   39.284  -5.8295  3.251e-08 ***
6   -38.071   19.290  -1.9736  0.050249 .
7  -450.709   49.279  -9.1461  3.771e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Рис. 9. Розраховані нульові члени панельної регресійної залежності розвитку вітрової енергетики від рівня економічного розвитку, попиту на електроенергію та приведеної вартості електроенергії серед ТОП 7 країн – лідерів розвитку вітрової енергетики у світі в Rstudio

Джерело: власні розрахунки

ний розвиток країни, а саме, при збільшенні ВВП на особу населення на 1000 дол. США відбувається збільшення генерації електроенергії з ВЕС на 6,07 ТВт*год. Особливої уваги заслуговує маржинальний вплив приведеної вартості генерації електроенергії з ВЕС, а саме, при зменшенні собівартості 1 кВт*год електроенергії з ВЕС на 1 дол. США відбувається збільшення обсягів генерації електроенергії з ВЕС на 208 ТВт*год.

Значення розрахованих нульових регресійних коефіцієнтів для кожної з країн, які брали участь у розрахунку панельної регресії, наведено на рис. 9. Кожний з нульових регресійних коефіцієнтів є також значимим за t-критерієм Стьюдента на рівні значимості менше 0,1.

Висновки. В результаті проведеного аналізу розвитку вітрової енергетики у світі можна зробити наступні висновки: на часовому гори-

зонти з 1995 до 2022 року включно щорічні темпи росту обсягів генерації електроенергії з ВЕС у світі склали 21%; основу збільшення обсягів генерації електроенергії з ВЕС у світі склали такі регіони, як Азія, Європа та Північна Америка; кожний з регіонів має значну концентрацію генерації електроенергії з ВЕС серед країн, зокрема Азія представлена Китаєм та Індією; Європа представлена Німеччиною, Великою Британією та Іспанією; Північна Америка представлена США; Південна та Центральна Америка представлена Бразилією; шляхом кореляційного аналізу було підтверджено наявність позитивного лінійного взаємозв'язку між обсягом генерації електроенергії з ВЕС та такими показниками, як ВВП на душу населення, попит на електроенергію та приведена вартість вироб-

ництва електроенергії з ВЕС; розрахована панельна регресія залежності розвитку вітрової енергетики від рівня економічного розвитку, попиту на електроенергію та приведеної вартості генерації електроенергії з ВЕС серед ТОП 7 країн – лідерів розвитку вітрової енергетики у світі підтвердила позитивний вплив пояснюючих змінних на розвиток вітрової енергетики; збільшення попиту на електроенергію на 1 ТВт*год призводить до збільшення генерації електроенергії з ВЕС на 0,073 ТВт*год.; збільшення ВВП на душу населення на 1000 дол. США призводить до збільшення генерації електроенергії з ВЕС на 6,07 ТВт*год.; зменшення собівартості 1 кВт*год електроенергії з ВЕС на 1 дол. США призводить до збільшення обсягів генерації електроенергії з ВЕС на 208 ТВт*год.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Benefits and potential impacts of wind energy. URL: <https://www.local.gov.uk/benefits-and-potential-impacts-wind-energy> (дата звернення: 31.08.2023).
2. Christopher Jung. Efficiency and effectiveness of global onshore wind energy utilization. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890423001346> (дата звернення: 31.08.2023).
3. Investment in renewable energy, by technology. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/investment-in-renewable-energy-by-technology> (дата звернення: 31.08.2023).
4. Mahfuz Kabir. Wind energy and its link to sustainability in developing countries. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323886680000085> (дата звернення: 31.08.2023).
5. Oliver Summerfield-Ryan. The power of wind: The global wind energy industry's successes and failures. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800923001040> (дата звернення: 31.08.2023).
6. Paul Veers, Katherine Dykes. Grand Challenges: Wind energy research needs for a global energy transition. URL: <https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2022-66/wes-2022-66.pdf> (дата звернення: 31.08.2023).
7. Per capita electricity generation from wind. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/wind-electricity-per-capita> (дата звернення: 31.08.2023).
8. Rizwana Yasmeen. The role of wind energy towards sustainable development in top-16 wind energy consumer countries: Evidence from STIRPAT model. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1342937X23001132> (дата звернення: 31.08.2023).
9. Wind energy generation by region. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/wind-energy-consumption-by-region> (дата звернення: 31.08.2023).
10. Levelized cost of energy by technology. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/levelized-cost-of-energy> (дата звернення: 31.08.2023).

REFERENCES:

1. Benefits and potential impacts of wind energy. URL: <https://www.local.gov.uk/benefits-and-potential-impacts-wind-energy> (accessed 31 August 2023).
2. Christopher Jung. Efficiency and effectiveness of global onshore wind energy utilization. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890423001346> (accessed 31 August 2023).
3. Investment in renewable energy, by technology. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/investment-in-renewable-energy-by-technology> (accessed 31 August 2023).
4. Mahfuz Kabir. Wind energy and its link to sustainability in developing countries. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323886680000085> (accessed 31 August 2023).
5. Oliver Summerfield-Ryan. The power of wind: The global wind energy industry's successes and failures. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800923001040> (accessed 31 August 2023).

6. Paul Veers, Katherine Dykes. Grand Challenges: Wind energy research needs for a global energy transition. URL: <https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2022-66/wes-2022-66.pdf> (accessed 31 August 2023).
7. Per capita electricity generation from wind. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/wind-electricity-per-capita> (accessed 31 August 2023).
8. Rizwana Yasmeen. The role of wind energy towards sustainable development in top-16 wind energy consumer countries: Evidence from STIRPAT model. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1342937X23001132> (accessed 31 August 2023).
9. Wind energy generation by region. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/wind-energy-consumption-by-region> (accessed 31 August 2023).
10. Levelized cost of energy by technology. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/levelized-cost-of-energy> (accessed 31 August 2023).