

УДК 620.92:621.311.245](4)(045)

С. В. Нараєвський,

к. е. н., доцент, доцент кафедри міжнародної економіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5527-893X>

DOI: 10.32702/2306-6792.2024.17.85

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЙ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ОКРЕМИХ КРАЇН ЄВРОПИ

S. Naraievskyi,

PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of International Economics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

THE EFFECTIVENESS OF WIND ENERGY TECHNOLOGIES IN CERTAIN EUROPEAN COUNTRIES

У статті проведено порівняльний аналіз ефективності роботи наземної та офшорної вітрової енергетики. Найпершими до розвитку вітрової енергетики долучилися розвинуті країни Європи та Північної Америки, а наступними були країни Азіатсько-Тихоокеанського регіону. Серед європейських країн першою у розвитку наземної та офшорної вітрової енергетики була Данія. Найперша у світі офшорна вітрова електростанція Vindeby, що була споруджена у Данії у 1991 р., була використана у якості дослідного майданчику, на якому відпрацьовувалися різноманітні технологічні процеси у роботі об'єктів офшорної вітрової енергетики.

При порівняння наземної та офшорної вітрової енергетик зазначено переваги та недоліки кожної з них. Серед переваг наземної вітрової енергетики виділено більш короткий термін спорудження об'єкту, менша вартість у розрахунку на одиницю потужності та менша складність, з технічного боку, реалізації цього об'єкту. Серед переваг офшорної вітрової енергетики виділено відсутність впливу на населення, оскільки вітрові установки розміщуються на морському шельфі, а основною перевагою є вища ефективність роботи вітрових установок за рахунок більшого коефіцієнта використання встановленої потужності.

Порівняльний аналіз наземної та офшорної вітрової енергетики було проведено на рівні п'яти європейських країн, у яких офшорна вітрова енергетика забезпечує значну частку загальних потужностей вітрової енергетики та, відповідно, обсягів виробленої електроенергії. Результати розрахунків підтвердили вищу ефективність роботи офшорної вітрової енергетики, за виключенням 2020 р. у Нідерландах. Найбільшого перевищення ефективності офшорної вітрової енергетики над наземними об'єктами було досягнуто у Данії у 2014 р.

Проаналізовано матеріали міжнародних та українських організацій, які підтверджують вагомий вітровий потенціал України і перспективи розвитку офшорної вітрової енергетики у разі його використання. Бойові дії в Україні, наразі, суттєво обмежують можливості реалізації цього потенціалу. Проте, в окремих випадках, є можливість розпочати спорудження об'єктів офшорної вітрової енергетики на внутрішніх водоймах, зокрема на Київському водосховищі р. Дніпро. Завдяки цьому вдасться відпрацювати технологічні рішення та провести дослідження ефективності роботи об'єкту офшорної вітрової енергетики в реальних умовах його експлуатації.

The article provides a comparative analysis of the effectiveness of onshore and offshore wind energy. The developed countries of Europe and North America were the first to join the development of wind energy, followed by the countries of the Asia-Pacific region. Denmark became the first among European countries in the development of onshore and offshore wind energy. The Danish Vindeby power plant was the first offshore wind farm in the world. It was an experimental site for working out the technological processes of offshore wind energy.

Onshore and offshore wind power have their own advantages and disadvantages. The advantages of onshore wind energy are a shorter term and lower cost of construction of the object, less complexity of the technical implementation of this object. The advantages of offshore wind energy are the absence of a negative impact on people, and the main advantage is a higher utilization rate of the installed capacity.

A comparative analysis of onshore and offshore wind energy conducted at the level of five European countries. Offshore wind energy in these countries provides a significant share of the total wind energy capacities and volumes of electricity generated. The results of the calculations confirmed the higher efficiency of offshore wind power, with the exception of 2020 in the Netherlands. In Denmark, in 2014, the largest increase in the efficiency of offshore energy over onshore energy achieved.

Ukraine has significant wind potential. The results of international and Ukrainian specialized organizations confirm this. The war in Ukraine significantly limits the possibilities of using this potential. There is a possibility of building wind energy facilities on inland reservoirs. The reservoirs of the Dnipro River are the most suitable for the creation of wind parks. The Kyiv Reservoir has the best opportunities for the implementation of relevant projects due to the following: the absence of settlements on the left bank of the reservoir, the presence of an electricity consumer, the possibility of creating an energy complex thanks to the combination of wind, hydro and thermal generation. This will provide an opportunity to work out technological solutions and conduct a study of the effectiveness of the offshore wind energy facility in real conditions.

Ключові слова: ефективність, наземна вітрова енергетика, офшорна вітрова енергетика, вітровий потенціал, коефіцієнт використання встановленої потужності, енергетичний комплекс.

Key words: efficiency, onshore wind energy, offshore wind energy, wind potential, capacity installed utilization factor, energy complex.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Трансформація енергетики, що наразі відбувається в багатьох країнах світу, передбачає поступове зниження обсягів використання традиційних енергетичних ресурсів (вугілля, нафти, природного газу) та заміну їх різними видами відновлюваних енергетичних ресурсів (енергія вітру, сонця, біомаси та ін.). Такий перехід має сприяти зменшенню негативного впливу енергетичної галузі на довкілля. Вітрова і сонячна енергія є джерелами енергії, що залежать від погодних умов і можуть суттєво змінювати обсяги генерації, через зміни сили та стабільності вітрових потоків, чи інтенсивності сонячної інсоляції. Тож, для їх успішного розвитку потрібно передбачати акумулюючі чи резервні потужності, які зможуть забезпечувати стабільність виробництва електричної енергії та узгоджувати її з потребами споживачів у конкретний проміжок часу.

Ще одним напрямом покращення роботи енергетики країни є підвищення ефективності роботи окремих джерел генерації, завдяки

збільшенню коефіцієнта використання встановленої потужності. Тож, при плануванні розвитку енергосистеми потрібно враховувати показники ефективності роботи кожного з окремих напрямів генерації. У вітровій енергетиці є широкий перелік технологічних рішень з перетворення енергії вітру в електричну енергію. Та все ж, незважаючи на значний перелік різноманітних технологічних рішень вітрових установок з вертикальним ротором, наразі, перевагу отримала технологія з горизонтальним розміщенням вітрового колеса з трьома лопатями. Такі установки поділяються на пристрої для наземного базування (встановлюються на суші) та офшорного базування (встановлюються на морському шельфі, чи іншій водоймі).

Офшорна вітрова енергетика має ряд переваг порівняно з установками наземного базування, серед яких основною перевагою є більша ефективність (вищий коефіцієнт використання встановленої потужності). Це надає можливість виробити більший обсяг електроенергії з одиниці потужності, та як наслідок, забезпечити зростання загальних обсягів генерації електроенергії і стабільності її постачання.

Доцільним буде дослідити досвід експлуатації наземної та офшорної вітроенергетики окремих країн Європи, по яким наявні дані для порівняння у відкритих джерелах. На основі отриманих результатів визначити пріоритетні напрями для розвитку вітрової енергетики України.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідженням тенденцій розвитку різноманітних джерел та технологій генерації у відновлюваній енергетиці займаються міжнародні організації, наукові та навчальні установи, транснаціональні корпорації, консалтингові компанії, окремі науковці.

Міжнародне агентство з поновлюваних джерел енергії (International Renewable Energy Agency (IRENA)) у своєму щорічному звіті Renewable Energy Statistics 2024 публікує статистику по різноманітним технологіям відновлюваної енергетики зазначаючи обсяги введених потужностей за період 2014—2023 рр. та обсяги виробництва електроенергії за період 2014—2022 рр. У вітровій енергетиці подається загальна статистика та окремо статистична інформація по наземній і офшорній вітроенергетиці. Членами цієї міжнародної організації є 168 країн та Європейський Союз [1].

Energy Institute продовжує публікувати щорічні статистичні звіти, якими протягом тривалого часу займалася британська нафтова компанія BP. Statistical Review World Energy 2024 є 72-м щорічним виданням за підтримки BP та за консультативної і фінансової підтримки консалтингових компаній з Нідерландів (KPMG) та США (Kearney). У даному дослідженні наводиться статистика по різних напрямках енергетики, зокрема й по встановленим потужностям та обсягам виробленої електроенергії у вітровій енергетиці починаючи з 1965 р. по 2023 р. Також, у ньому є розподіл потужностей вітрової енергетики на наземну та офшорну у 2022 та 2023 рр. [2].

Окремо вітроенергетикою у загальносвітових масштабах займаються Глобальна рада з вітроенергетики (Global Wind Energy Council (GWEC)) [3] та Всесвітня асоціація вітрової енергетики (World Wind Energy Association (WWEA)) [4]. На рівні країн Європи діяльність у вітроенергетиці координує Європейська асоціація вітрової енергетики (Wind Europe) [5]. Ця організація публікує щорічні аналітичні звіти з розвитку вітроенергетики загалом (Wind Energy in Europe. 2023 Statistics and the outlook for 2024—2030), а у 2022 р. публікувала аналі-

тичний звіт з розвитку офшорної енергетики за підсумками 2021 р. та прогноз розвитку до 2030 р. (Offshore wind vessel availability until 2030: Baltic Sea and Polish Perspective. Final Report).

В Україні профільною організацією у вітровій енергетиці є Українська вітроенергетична асоціація (УВЕА) [6]. Головою правління УВЕА є Конеченков А. Є., який також є одним з віце-президентів WWEA. Провідною науковою установою у відновлюваній енергетиці в Україні є Інститут відновлюваної енергетики НАН України (ІВЕ НАН України) [7]. У цій установі є шість окремих відділів, один з яких займається вітроенергетикою. Керівником ІВЕ НАН України та відділу вітроенергетики є Кудря С. О.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ (ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ)

Метою статті є проведення порівняльного аналізу ефективності роботи технологій вітрової енергетики окремих країн Європи. На основі цього аналізу потрібно провести визначення пріоритетних напрямів розвитку вітроенергетики України, що мають забезпечити більш ефективну і стабільну роботу енергосистеми. Методологічну основу дослідження становлять методи статистичного дослідження, оцінювання зміни показників у динаміці, порівняльного аналізу, визначення пріоритетних напрямів розвитку, логічного узагальнення.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розвиток різних напрямів відновлюваної енергетики був зумовлений потребами зменшення залежності розвинутих країн від постачання традиційних енергетичних ресурсів (вугілля, нафта, природний газ) з-за кордону, зниження негативного впливу від роботи теплових електростанцій на навколишнє середовище. Вітрова енергетика була одним з напрямів відновлюваної енергетики, що почала свій розвиток у країнах Європи у 70-х — 80-х рр. XX ст. Першими країнами, що долучилися до розвитку вітрової енергетики були Данія (1978 р.), Швеція (1983 р.), Нідерланди та Німеччина (1986 р.). На початку 90-х рр. XX ст. уже понад десять країн Європи почали розвивати власну вітрову енергетику. Данія була першою країною Європи та світу, що протягом календарного року досягла показника у понад 1 млрд кВт·год виробленої електроенергії у вітровій енергетиці (1993 р.). Наступними були такі країни: Німеччина (1995 р., 1,5 млрд кВт·год), Іспа-

Таблиця 1. Провідні країни світу у розвитку вітрової енергетики (2023 р.)

Країна	Встановлена потужність		Країна	Виробництво електроенергії	
	МВт	Частка у загальносвітовому показнику, %		млрд кВт×год	Частка у загальносвітовому показнику, %
1. Китай	441 895	43,4	1. Китай	885,9	38,1
2. США	148 020	14,6	2. США	429,5	18,5
3. Німеччина	69 459	6,8	3. Німеччина	142,1	6,1
4. Індія	44 736	4,4	4. Бразилія	95,5	4,1
5. Іспанія	31 028	3,1	5. Індія	82,1	3,5
6. Великобританія	30 215	3,0	6. Великобританія	82,0	3,5
7. Бразилія	29 135	2,9	7. Іспанія	64,2	2,8
8. Франція	22 196	2,2	8. Франція	52,3	2,2
9. Канада	16 989	1,7	9. Канада	38,9	1,7
10. Швеція	16 252	1,6	10. Швеція	34,3	1,5

Джерело: сформовано на основі [2].

нія (1998 р., 1,4 млрд кВт×год), Італія (2001 р., 1,2 млрд кВт×год) та Великобританія (2001 р., 1,0 млрд кВт×год). Розвинуті країни Північної Америки долучилися до розвитку вітроенергетики разом з країнами Європи: США (1983 р.), Канада (1985 р.). Наступним був Азіатсько-Тихоокеанський регіон: Китай (1990 р.), Індія (1990 р.), Нова Зеландія (1992 р.), Австралія (1993 р.), Японія (1993 р.) [2].

На початку свого розвитку вітрові установи розміщувалися лише на суходолі. Розвиток офшорної вітрової енергетики почався із відставанням у майже два десятиліття. Перша офшорна вітрова електростанція Vindeby, була побудована у Данії у 1991 р. Вона мала одинадцять вітрових установок одиничною потужністю 450 кВт, загальна потужність усієї вітрової електростанції наближалася до 5 МВт та повинна була забезпечувати електроенергією потреби 2200 домогосподарств. Фактично данська вітрова електростанція Vindeby виконала роль дослідного полігону для офшорної вітроенергетики. У 2017 р. ця вітрова електростанція була демонтована. У ХХІ ст. до розвитку офшорної енергетики долучилися Німеччина, Бельгія та Великобританія. Країни за межами Європи до розвитку саме офшорної вітрової енергетики долучилися зі значним відставанням. Так, у США перша комерційна офшорна вітрова електростанція (Block Island, штат Род-Айленд) була введена в експлуатацію лише у 2016 р. [8].

Наразі вітрова енергетика досягла значного рівня розвитку у різних регіонах та країнах світу. За обсягами введених потужностей у вітроенергетиці лідируючими регіонами світу є такі: Азіатсько-Тихоокеанський регіон — 520 912 МВт (51,2 % загальносвітової потужності вітроенергетики), Європа — 268 708 МВт (26,4 %), Північна Америка — 172 327 МВт (16,9%). У виробництві електроенергії у вітро-

енергетиці ці регіони також займають домінуюче положення: Азіатсько-Тихоокеанський регіон — 1 045,2 млрд кВт×год (44,9 % загальносвітового виробництва електроенергії у вітроенергетиці), Європа — 614,1 млрд кВт×год (26,4 %), Північна Америка — 490,1 млрд кВт×год (21,1 %). Сукупна частка цих трьох регіонів у загальносвітових потужностях вітрової енергетики становить 94,5 %, а у виробництві електроенергії — 92,4 %. Провідні країни у розвитку вітрової енергетики наведені у табл. 1.

Більшість країн світу основні власні потужності вітроенергетики розвивали, насамперед, за рахунок об'єктів наземного базування. Це зумовлено меншими витратами на одиницю потужності для об'єктів наземної генерації, меншим проміжком часу на спорудження вітрового парку аналогічної потужності та меншою складністю з точки зору техніки та технології при реалізації об'єктів наземної вітрової енергетики. Провідні країни у розвитку наземної вітрової енергетики наведені у табл. 2. У даному випадку доцільно провести порівняння за показниками 2022 р., оскільки окремої статистичної інформації про обсягам виробництва електроенергії у наземній та офшорній вітровій енергетиці за 2023 р. у відкритих джерелах немає.

Оскільки офшорна вітроенергетика почала розвиватися зі значним відставанням від наземної вітрової енергетики, то кількість країн, що наразі активно розвивають цей напрям вітрової енергетики є значно меншим. Так, країн, що за обсягами виробленої електроенергії у офшорній вітровій енергетиці за підсумками 2022 р. перевищили показник у 1 млрд кВт×год було лише вісім. Провідні країни у розвитку офшорної вітрової енергетики наведені у табл. 3.

Офшорна вітрова енергетика порівняно з наземною, має не лише недоліки, про які було

Таблиця 2. Провідні країни світу у розвитку наземної вітрової енергетики (2022 р.)

Країна	Встановлена потужність		Країна	Виробництво електроенергії	
	МВт	Частка у загальносвітовому показнику, %		млрд кВт×год	Частка у загальносвітовому показнику, %
1. Китай	335 504	39,9	1. Китай	604,0	31,2
2. США	141 633	16,9	2. США	439,1	22,7
3. Німеччина	58 014	6,9	3. Німеччина	99,7	5,1
4. Індія	41 930	5,0	4. Бразилія	81,6	4,2
5. Іспанія	30 109	3,6	5. Індія	69,4	3,6
6. Бразилія	24 163	2,9	6. Іспанія	62,8	3,2
7. Франція	20 310	2,4	7. Франція	38,0	2,0
8. Канада	15 081	1,8	8. Канада	36,9	1,9
9. Швеція	14 086	1,7	9. Швеція	32,7	1,7
10. Австралія	11 966	1,4	10. Австралія	29,1	1,5

Джерело: сформовано на основі [1, с. 32—37].

Таблиця 3. Провідні країни світу у розвитку офшорної вітрової енергетики (2022 р.)

Країна	Встановлена потужність		Країна	Виробництво електроенергії	
	МВт	Частка у загальносвітовому показнику, %		млрд кВт×год	Частка у загальносвітовому показнику, %
1. Китай	30 460	48,7	1. Китай	63,6	39,3
2. Великобританія	13 928	22,2	2. Великобританія	45,0	27,8
3. Німеччина	8 149	13,0	3. Німеччина	25,1	15,5
4. Нідерланди	2 570	4,1	4. Данія	8,8	5,4
5. Данія	2 306	3,7	5. Нідерланди	8,0	4,9
6. Бельгія	2 262	3,6	6. Бельгія	6,7	4,1
7. В'єтнам	994	1,6	7. Тайвань	1,7	1,0
8. Тайвань	745	1,2	8. В'єтнам	1,7	1,0
9. Франція	501	0,8	9. Швеція	0,6	0,34
10. Швеція	193	0,3	10. Фінляндія	0,3	0,14

Джерело: сформовано на основі [1, с. 38—39].

зазначено вище, а й суттєві переваги. Основною перевагою офшорної вітрової енергетики над об'єктами наземного базування є вищий коефіцієнт використання встановленої потужності. Проведемо порівняльний аналіз ефективності роботи наземної та офшорної вітрової енергетики, а також порівняємо їх із середньою ефективністю роботи вітрової енергетики окремих країн Європи. Для підвищення об'єктивності аналізу залишимо країни Європи (Бельгія, Данія, Німеччина, Нідерланди, Великобританія), що мали значні потужності у офшорній вітровій енергетиці протягом певного періоду (2014—2022 рр.). Серед інших регіонів світу лише Китай, Тайвань та В'єтнам мали обсяги виробництва електроенергії у офшорній вітровій енергетиці, що перевищили 1 млрд кВт×год. Тайваню та В'єтнаму цього показника вдалося досягти лише у 2022 р. Також, у кожній з цієї трійки країн офшорна вітрова енергетика не перевищує 10,0 % загальних потужностей вітрової енергетики та обсягів виробництва електроенергії у вітровій енергетиці, що робить аналіз їхніх показників недоцільним.

Для розрахунку ефективності роботи вітрової енергетики беремо відношення обсягу вироб-

леної електроенергії до обсягу встановлених потужностей. Отримаємо кількість кВт×год виробленої електроенергії, що забезпечується одним кВт встановленої потужності. Далі, для переведення отриманого результату у відсотки ділимо його на 8 760 год (365 днів за рік помножене на 24 год за добу) та перемножимо на 100. Результати розрахунків наведено у табл. 4. По кожній з країн, які виділили для порівняння, розраховано три показники: загальна ефективність роботи вітрової енергетики, ефективність наземної вітрової енергетики, ефективність офшорної вітрової енергетики. Також, розрахована різниця між показниками офшорної вітрової енергетики та наземної вітрової енергетики.

Результати розрахунку ефективності роботи вітрової енергетики засвідчили суттєву перевагу офшорної вітрової енергетики над наземною. Виключенням є лише 2020 р. у Нідерландах. Цього року ефективність наземної вітрової енергетики перевищувала відповідний показник офшорної вітрової енергетики на 1,3%. Така ситуація зумовлена тим, що 2020 р. у Нідерландах встановлена потужність офшорної вітрової енергетики зросла з 957 МВт до

Таблиця 4. Порівняльний аналіз ефективності роботи вітрової енергетики окремих країн Європи (2014–2022 р.)

Країна	Вид вітрової енергетики	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Бельгія	загальна	27,3	29,2	26,5	26,8	26,2	28,8	31,3	27,7	26,6
	наземна	22,4	23,0	21,3	21,0	22,4	24,5	27,7	21,5	21,4
	офшорна	35,7	41,9	38,3	37,4	32,8	35,2	35,2	35,0	32,9
	різниця	13,3	18,9	17,0	16,4	10,4	10,7	7,5	13,5	11,5
Данія	загальна	30,6	31,8	27,7	30,7	25,9	30,2	29,8	26,2	30,7
	наземна	22,7	27,9	23,4	25,9	23,9	25,8	24,4	20,6	24,5
	офшорна	46,4	43,4	41,8	46,8	31,1	41,6	44,3	37,6	43,3
	різниця	23,7	15,5	18,4	20,9	7,2	15,8	19,9	17,0	18,8
Німеччина	загальна	17,3	20,6	18,5	21,7	21,4	23,7	24,2	20,5	21,5
	наземна	17,3	20,0	17,0	20,0	19,8	21,7	22,0	18,3	19,6
	офшорна	17,8	28,8	33,9	37,3	34,8	37,4	40,0	35,6	35,2
	різниця	0,5	8,8	16,9	17,3	15,0	15,7	18,0	17,3	15,6
Нідерланди	загальна	23,4	25,4	21,9	28,7	27,4	29,3	26,2	26,8	27,9
	наземна	21,9	24,2	20,4	24,2	23,0	25,7	26,7	22,1	24,7
	офшорна	37,5	36,1	27,1	44,1	43,3	42,6	25,4	36,9	35,6
	різниця	15,6	11,9	6,7	19,9	20,3	16,9	-1,3	14,8	10,9
Великобританія	загальна	27,9	32,1	26,3	28,9	30,1	30,5	35,2	28,7	31,9
	наземна	24,7	28,3	21,8	26,0	25,8	26,0	28,1	23,0	27,1
	офшорна	34,0	39,1	35,4	34,2	37,0	36,9	44,7	36,0	36,9
	різниця	9,3	10,8	13,6	8,2	11,2	10,9	16,6	13,0	9,8

Джерело: розраховано на основі [1, с. 26–39].

Таблиця 5. Потенціал розвитку офшорної вітрової енергетики за оцінкою ІВЕ НАН України

Акваторія	Площа мілководдя, км ²	Експертна оцінка території зони, придатної для розміщення ВЕС, %	Площа придатна для розміщення ВЕС, км ²	Щільність розміщення, МВт, км ²	Потужність ВЕС, ГВт
Азовське та Чорне море	19 000	30,0	5 700	35	199,5
Затока Сиваш	2 500	25,0	625	30	18,8
Дніпровський каскад водосховищ	6 888	15,0	1 033	25	25,8
Лимани	1 500	15,0	225	25	5,6
Разом	29 888	25,0	7 583		249,7

Джерело: сформовано на основі [10, с. 6–8].

2 460 МВт (у 2,57 рази). Інформації, в який період року ці потужності вводилися та скільки часу протягом року вони мали можливість працювати, у відкритому доступі немає. Тому, цей рік є непоказовим для порівняння. Діапазони перевищення ефективності офшорної вітрової енергетики над наземною по окремим країнам становили: Бельгія від 7,5 % до 17,0 %, Данія від 7,2 % до 23,7 %, Німеччина від 0,5 % до 18,0 %, Нідерланди від -1,5 % до 20,3 %, Великобританія від 8,2 % до 16,6 %.

Отже, для підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності, та, як наслідок, збільшення виробництва електроенергії, а також підвищення стабільності роботи енергосистеми доцільно надавати пріоритет розвитку офшорній вітровій енергетиці перед наземною. Перевага офшорної вітрової енергетики зумовлена більш сильними та стабіль-

ними вітровими потоками над морським шельфом, ніж над ділянками суші. Це зумовлено відсутністю перешкод від рельєфу місцевості. Також, це дає можливість встановлювати у офшорній вітровій енергетиці вітрові установки більшої одиничної потужності. На 2023 р. максимальні параметри вітрової установки у наземній вітровій енергетиці були такі: висота — 245 м, діаметр вітрового колеса — 220 м, потужність 10 МВт. У офшорній вітровій енергетиці відповідні параметри становили: висота — 300 м, діаметр вітрового колеса — 280 м, потужність 18 МВт. За прогнозами GWEC у 2030 р. максимальні параметри вітрової установки мають становити у наземній вітровій енергетиці: діаметр вітрового колеса — 270 м, потужність 15 МВт, а у офшорній вітровій енергетиці: діаметр вітрового колеса — 350 м, потужність 25 МВт [9, с. 53].

Таблиця 6. Порівняльна характеристика водосховищ р. Дніпро

Водосховище	Площа, км ²	Об'єм, км ³	Глибина максимальна, м	Глибина середня, м
Київське	922	3,7	15	4,1
Канівське	675	2,6	19	4,4
Кременчуцьке	2 250	13,5	28	6,0
Кам'янське	567	2,45	14	4,3
Дніпровське	410	3,3	62	8,2
Каховське (до 2023 р.)	2 155	18,2	36	8,4

Джерело: сформовано на основі [11].

За оцінками IRENA вітровий потенціал України становить 466 ГВт (наземна — 320 ГВт, офшорна — 146 ГВт), а за оцінками IBE НАН України він складає 688 ГВт (наземна — 438 ГВт, офшорна — 250 ГВт). Результати розрахунків потенціалу офшорної вітрової енергетики IBE НАН України наведені у табл. 5 [10, с. 8].

Через війну в Україні розбудовувати об'єкти офшорної вітрової енергетики на більшості із зазначених у табл. 5 акваторіях, наразі, неможливо. Реальним є лише Дніпровський каскад водосховищ та лимани, що розташовані в Одеській та, можливо, Миколаївській областях. Водосховища на р. Дніпро, також можуть бути використані не в повній мірі. Після руйнування греблі Каховської ГЕС та спуску води з Каховського водосховища розбудовувати там офшорну вітроенергетику неможливо. Порівняльна характеристика водосховищ р. Дніпро наведена у табл. 6.

Основними характеристиками при виборі водойми для наступного впровадження об'єктів офшорної вітрової енергетики можна вважати площу дзеркала цієї водойми, середню глибину, мінімальну кількість житлової та іншої забудови на її узбережжі та наявність споживачів виробленої електроенергії. Найбільшим за площею басейну (за виключенням Каховського водосховища) є Кременчуцьке (2 250 км²), а середня глибина найменша є Київському водосховищі (4,1 м). Додатковою перевагою Київського водосховища є фактично повна відсутність населених пунктів та промислових об'єктів на лівому березі в межах 2—5 км. Тож розміщені на водоймі вітрові установки не будуть заважати мешканцям навколишніх сільських громад. Великим споживачем виробленої електричної енергії поряд є м. Київ. Лише на Київському водосховищі в басейні р. Дніпро поряд з гідроелектростанцією (ГЕС) є гідроакумуляуюча станція (ГАЕС). Також, є теплова генерація у м. Києві. Таку комбінацію, вітрової енергетики як нестабільного джерела електроенергії та гідроенергетики, а особливо ГАЕС,

яка може компенсувати цю нестабільність, можна розглядати потенційно стабільним енергетичним комплексом, що може враховувати потреби споживачів та підлаштовуватися під них.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В межах виконаного дослідження проведено оцінювання ефективності роботи технологій вітроенергетики окремих країн Європи. Зіснуючих технологічних рішень окремо оцінювалися ефективність наземної вітрової енергетики та офшорної вітрової енергетики, а також сукупний показник. Серед різних регіонів світу найвищого рівня використання вітроенергетики досягла у країнах Азіатсько-Тихоокеанського регіону (51,2 % встановлених потужностей та 44,9 % виробленої електроенергії), країнах Європи (по 26,4 %) та країнах Північної Америки (16,9 % та 21,1 % відповідно).

При порівнянні наземної та офшорної вітрової енергетики зазначено, що кожна з них має свої переваги. Наземна вітрова енергетика є дешевшою для впровадження з розрахунку одиниці потужності та технічного і технологічного впровадження. Офшорна вітрова енергетика має вищу ефективність роботи (коефіцієнт використання встановленої потужності) за рахунок більш сильних і стабільних вітрових потоків та відсутності перешкод рельєфу. За цієї переваги у офшорній вітровій енергетиці може бути згенеровано більший обсяг електроенергії з одиниці встановленої потужності.

Аналіз статистичної інформації засвідчив, що рівень використання офшорної вітрової енергетики суттєво відстає від наземної енергетики. Наразі офшорна вітрова енергетика лише починає розвиватися, а значних обсягів досягнуто у декількох країнах Європи та Китаї. Для порівняння було обрано п'ять країн Європи (Бельгія, Данія, Німеччина, Нідерланди, Ве-

ликобританія), у яких частка офшорної вітрової енергетики перевищує хоча б 10,0 % загальних обсягів розвитку вітрової енергетики, що має забезпечити більший рівень об'єктивності проведеного дослідження. Порівняльні показники розвитку офшорної вітрової енергетики протягом усього досліджуваного періоду (2014—2022 рр.) перевищували показники наземної вітрової енергетики, за виключенням 2020 р. у Нідерландах. Найвищий рівень перевищення показника офшорної вітрової енергетики над наземною було досягнуто у Данії (на 23,7 %) у 2014 р.

Дослідження міжнародних (IRENA) та українських (ІВЕ НАН України) організацій свідчать, що Україна має значний потенціал для розвитку вітрової енергетики. Через окупацію частини території України та військові дії, для розвитку офшорної енергетики доступна лише незначна частина наявного потенціалу. Серед водосховищ р. Дніпро найбільш придатним можна вважати Київське водосховище, що зумовлено його параметрами, відсутністю населених пунктів на лівому березі, наявністю великого споживача електроенергії (м. Київ), можливістю утворення енергетичного вузла завдяки поєднанню вітрової енергетики, гідроенергетики та теплової енергетики.

У наступних дослідженнях можна розрахувати можливі обсяги встановлених потужностей на басейні Київського водосховища р. Дніпро при використанні вітрових установок різної одиничної потужності та спрогнозувати можливі обсяги виробництва електроенергії при різному коефіцієнті використання встановленої потужності.

Література:

1. Renewable Energy Statistics 2024. IRENA Secretariat. International Renewable Energy Agency (IRENA). — Abu Dhabi. IRENA Secretariat, 2023. — 299 p.
2. EI Statistical Review of World Energy 2024. Energy Institute (EI). URL: <https://www.energyinst.org/statistical-review/home>.
3. Global Wind Energy Council (GWEC). URL: <https://gwec.net>.
4. World Wind Energy Association (WWEA). URL: <https://wwindea.org>.
5. Wind Europe. URL: <https://windeurope.org>.
6. Українська вітроенергетична асоціація (УВЕА). URL: <https://uwea.com.ua/ua/>.
7. Інститут відновлюваної енергетики НАН України (ІВЕ НАН України). URL: <https://www.ive.org.ua/>.
8. Offshore Wind — A Brief History. Marine Technology News. URL: [https://www.marine-](https://www.marine-technologynews.com/news/offshore-brief-history-590397)

[technologynews.com/news/offshore-brief-history-590397](https://www.marine-technologynews.com/news/offshore-brief-history-590397).

9. Global Wind Report 2024. GWEC. Global Wind Energy Council (GWEC). — Brussels. GWEC. 2024. — 168 p.

10. Книш К. Кудря С., Біла книга 2021. Офшорна вітроенергетика та "зелений" водень: відкриття нових меж енергетичної потужності України. К.: ІВЕ НАН України, 2022. 16 с.

11. Дніпровський каскад ГЕС. Енциклопедія сучасної України. URL: <https://esu.com.ua/article-22200>.

References:

1. IRENA Secretariat. (2024), Renewable Energy Statistics 2024, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, United Arab Emirates.
 2. Energy Institute (EI) (2024), "EI Statistical Review of World Energy 2024", available at: <https://www.energyinst.org/statistical-review/home> (Accessed 25 July 2024).
 3. Global Wind Energy Council (GWEC) (2024), available at: <https://gwec.net> (Accessed 14 August 2024).
 4. World Wind Energy Association (WWEA) (2024), available at: <https://wwindea.org> (Accessed 14 August 2024).
 5. Wind Europe (2024), available at: <https://windeurope.org> (Accessed 14 August 2024).
 6. Ukrainian Wind Energy Association (2024), available at: <https://uwea.com.ua/ua/> (Accessed 14 August 2024).
 7. Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine (2024), available at: <https://www.ive.org.ua/> (Accessed 14 August 2024).
 8. Marine Technology News (2019), "Offshore Wind — A Brief History", Marine Technology News, available at: <https://www.marine-technologynews.com/news/offshore-brief-history-590397> (Accessed 14 August 2024).
 9. Global Wind Energy Council (GWEC). (2024), Global Wind Report 2024, Global Wind Energy Council (GWEC), Brussels, Belgium.
 10. Knysh K.S. and Kudria S.O. (2022), Offshorna vitroenerhetyka ta "zelenyi" voden: vidkryttia novykh mezh enerhetychnoi potuzhnosti Ukrainy [White book 2021. Offshore wind energy and "green" hydrogen: opening new frontiers of Ukraine's energy capacity], IVE NAN Ukrainy, Kyiv, Ukraine.
 11. Encyclopedia of modern Ukraine (2024), "Dnipro Cascade PHP", <https://esu.com.ua/article-22200> (Accessed 14 August 2024).
- Стаття надійшла до редакції 19.08.2024 р.*