

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ОФШОРНИХ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Отримано 01 вер. 2023 р.; рекомендовано до публікації 22 вер. 2023 р.  
Доступно онлайн 30 вер. 2023 р.

І. В. Нечай<sup>1</sup>

Автор для кореспонденції: Інна Нечай,  
e-mail: innane1811@gmail.com

<sup>1</sup> магістр.<https://orcid.org/0000-0001-9624-6803>

<sup>1</sup> НТУУ «Київський політехнічний інститут ім.  
Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

*Світова спільнота намагається відшукати більше екологічних способів виробництва електроенергії. Офшорні вітроелектростанції є одним з тих видів станцій, які можуть виробляти значну кількість електроенергії. Одна така станція може забезпечувати прибережне місто незалежно від загальної мережі. В міру того, як збільшуватиметься віддаленість вітрових турбін від берега, зростатиме кількість виробленої енергії.*

**Ключові слова:** вітрова турбіна, вітроелектростанція.

## EFFICIENCY OF OFFSHORE WIND POWER PLANTS

Received Sept. 01, 2023; accepted Sept. 22, 2023  
Available online Sept. 30, 2023

І. Nechai<sup>1</sup>

Author for correspondence: Inna Nechai,  
e-mail: innane1811@gmail.com

<sup>1</sup> magister<https://orcid.org/0000-0001-9624-6803>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Igor  
Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv,  
Ukraine.

*The global community is looking for more and more environmentally friendly ways to generate electricity. Offshore wind power stations are one of those types of stations that can provide electricity in large quantities. One such station can supply a coastal city independently of the general grid. Depending on how far out to sea we can place wind turbines, the amount of energy produced will increase.*

**Keywords:** wind power station, wind turbine.

## Перелік використаних позначень та скорочень

BEC – вітроелектростанція

WPS – wind power station

## Вступ

Світовий ринок офшорної вітроенергетики зростає майже на 30 % за рік між 2010 і 2018 роками завдяки швидкому вдосконаленню технологій, і близько 150 нових офшорних вітрових проєктів активно розвиваються по всьому світу. Зокрема, Європа (насамперед Велика Британія, Німеччина та Данія) сприяла розвитку технологій, але Китай додав більше потужностей, ніж будь-яка інша країна в 2018 році.

Проте сьогоднішній офшорний ринок вітроенергетики навіть не наближається до використання повного потенціалу – завдяки високоякісним ресурсам, доступним на

більшості основних ринків, офшорний вітер має потенціал генерувати понад 420 000 ТВт•год на рік у всьому світі.

Від появи першої офшорної вітроелектростанції у 1991 році в п'яти країнах світу — Швеції, Данії, Ірландії, Нідерландах і Сполученому Королівстві – сумарна потужність офшорного вітроенергетичного парку зросла до 770 МВт. Реалізовані проєкти були в основному демонстраційними, одночасно виконуючи роль випробувальних полігонів для розробників і виробників офшорних вітроелектростанцій. Тепер можна впевнено стверджувати: розпочався новий етап у розвитку галузі, який передбачає впровадження тисяч мегават офшорних вітроенергетичних потужностей. І хоча води Північного моря залишаються, як

і раніше, в центрі офшорної вітроенергетичної активності, можливість реалізації «морських» проєктів розглядається багатьма країнами світу.

**Постановка завдання.** Дослідження ефективності офшорних вітроелектростанцій, огляд переваг та недоліків такої станції, дослідження типів кріплень та місця розташування вітрових турбін відносно глибини водойми. А також ознайомлення з поширеністю таких станцій у світі та їх спроможністю.

**Результати дослідження.** Завдання цього дослідження — з'ясувати, наскільки ефективним є такий вид виробництва електроенергії, наскільки вигідно встановлювати такі станції, де найкраще їх розмістити і який тип кріплень є найпопулярнішим та найкращим.

**1. Розповсюдження офшорних ВЕС.** Сполучене Королівство є країною з найбільшою встановленою потужністю в Європі. Далі йдуть Німеччина, Нідерланди, Данія, Бельгія і Франція. В інтернеті є ресурс, на якому можна переглянути всі Європейські офшорні станції [6].

Першу морську вітрову електростанцію Ravnosborg збудували в Данії у 1991 році. Сумарна потужність її турбін становила 5 МВт. Станція відпрацювала на вітрах Балтійського моря 26 років, ставши успішним прикладом інноваційного проєкту. Десятьма роками пізніше Данія відкрила нову сторінку в офшорній вітроенергетиці, встановивши поблизу Копенгагена першу в світі велику вітроелектростанцію потужністю 40 МВт – Мідделгрунден (Middlegrunden), а згодом – ще дві 160-мегаватні станції: Хорнс Рев (Horns Rev) і Нїстед (Nysted). Ці дві офшорні ВЕС вивели Данію з її 380 МВт у світові лідери за потужністю офшорної вітроенергетики. Та й за показником встановлених офшорних вітроенергетичних потужностей на душу населення поки що немає рівних Данії.

Подібно Данії, Сполучене Королівство успішно «експлуатує» енергію морського вітру. Завдяки проєктам, схваленим урядом у рамках спеціальної Програми ліцензування будівництва офшорних ВЕС, у 2008–2009 роках Велика Британія планувала стати головним світовим ринком офшорної вітроенергетики, що, як ми зараз бачимо, і сталося. Розроблена Королівським Офісом Програма передбачала два етапи — раунди реалізації. Під час першого раунду розглядалися заявки на будівництво офшорних ВЕС, які склалися не більш ніж із тридцяти вітротурбін. Далі було надано дозволи на реалізацію тринадцяти проєктів загальною встановленою потужністю 1500 МВт. Чотири з них — сумарною потужністю 300 МВт — уже були втілені у життя до 2008 року. П'ятий проєкт перебував на завершальній стадії будівництва, ще три планувалося реалізувати до кінця 2008 року. На початок 2009-го в рамках першого раунду були введені в експлуатацію близько 900 МВт офшорних вітроенергетичних потужностей.

Другий раунд програми «відкривав двері» великим офшорним вітроенергетичним проєктам, не обмежуючи їх встановлену потужність. При цьому 15 проєктів сумарною встановленою потужністю 7169 МВт (що дасть

змогу забезпечити близько 7 % електроенергії Сполученого Королівства) отримали позитивні відгуки під час попереднього розгляду. Деякі з цих проєктів, як-от, наприклад, Лондон Еррей (London Array) і Трітон Кнолл (Triton Knoll), «викликали особливу повагу» своєю потужністю — понад 1000 МВт кожний! Практично всі проєкти, передбачені другим етапом програми, сконцентровані на трьох основних ділянках — гирло Темзи, територія уздовж східного узбережжя Англії та прибережні води на північному заході Англії.

Розвиток офшорної вітроенергетики вважається дуже перспективним для США, оскільки країна має довгу берегову лінію та чималі вітроенергетичні ресурси. За результатами дослідження, проведеного університетом Делавер, реальний потенціал офшорної вітроенергетики лише уздовж «середньоатлантичного» узбережжя від знаменитого курорту Кейп-Код до Нью-Йорка може сягати 330 ГВт — цілком достатньо для забезпечення електроенергією всіх дев'яти середньоатлантичних штатів.

На жаль, у країні з таким потенціалом станом на 2016 рік було реалізовано першу офшорну вітроелектростанцію. На початку 2000-х США перебували лише на самому початку «офшорного» шляху. Лідером у цьому напрямі можна вважати штат Техас. У 2008 році там подали заявку на будівництво 150-мегаватної ВЕС (50 турбін по 3 МВт кожна) у районі Мексиканської затоки біля берегів острова Галвестон. Ішла підготовка до створення вітропарку потужністю 250–500 МВт у Баффіновій затоці, ліцензія на який була отримана в 2006 році.

Поряд з Європою, Китай зробив кроки вперед щодо офшорної вітроенергетики і зараз є одним з лідерів ринку. В 2018 році Китай додав 1,6 ГВт офшорних вітрових потужностей, найбільше з усіх країн.

Глобальний офшорний ринок вітроенергетики має значно розширитися протягом наступних двох десятиліть, зростаючи на 13 % за рік у сценарії заявленої політики. За прогнозами, підкріпленими політичними цілями та падінням витрат на технології, глобальні офшорні вітрові потужності збільшаться в п'ятнадцять разів до 2040 року, ставши галуззю вартістю 1 трильйон доларів протягом наступних двох десятиліть, — відповідно до капітальних витрат на газові та вугільні потужності за той же період. Такий рівень інвестицій означає, що на офшорну вітроенергетику припадає 10 % інвестицій в електростанції, що базуються на відновлюваних джерелах енергії, в усьому світі.

Як видно з рис. 1. Європа залишається технологічним лідером до 2040 року, але Китай закриває розрив, викликаний недавніми зусиллями з розширення своїх будівельних потужностей для офшорної вітроенергетики. У Сполучених Штатах цілі на рівні штатів визначають курс на швидке зростання протягом наступного десятиліття.

Індія, Корея та китайський Тайбей також мають амбітні цілі, тоді як інші країни, включаючи Японію та Канаду, закладають основу для майбутнього розвитку офшорної вітроенергетики.

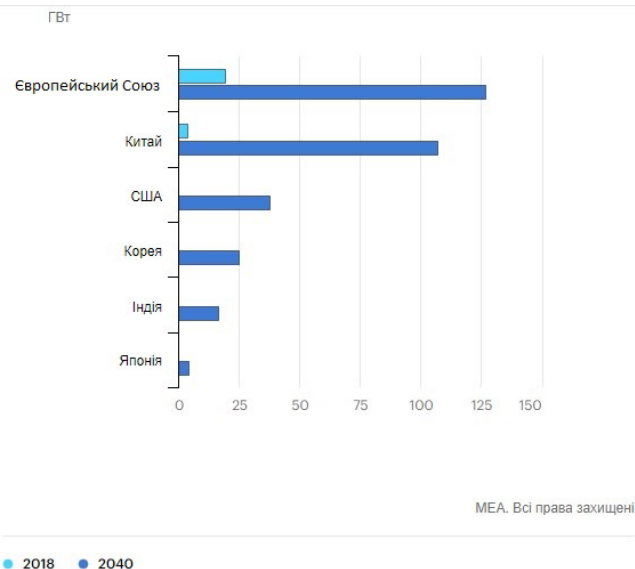


Рис. 1. Встановлені офшорні вітрові потужності, 2018 та 2040 роки, заявлений сценарій політики

Fig. 1. Installed offshore wind capacity, 2018 and 2040, stated policy scenario

**2. Офшорні ВЕС та їх ефективність.** Офшорна вітрова енергія — це чиста та відновлювана енергія, отримана завдяки використанню сили вітру, що створюється у відкритому морі, де він досягає вищої та більш постійної швидкості, ніж на суші, через відсутність бар'єрів. Навіть невелике збільшення швидкості вітрових потоків може призвести до значного збільшення вироблення електроенергії. Якщо врахувати ще узгодженість напрямку, то це означає, що для морських установок потрібна менша кількість турбін для виробництва такої самої кількості енергії, ніж для наземних вітряних електростанцій. Офшорні турбіни не мають такого сильного візуального впливу, як наземні. Вони не заважають використанню землі, і немає фізичних перешкод, які можуть перервати потік вітру.

Також важливим фактором більшої ефективності офшорної станції є те, що вітер в морі стабільніший, ніж на суші. Швидкість вітру в морі не так сильно змінюється, а напрямок вітру змінюється не так часто, тому офшорні турбіни є стабільнішими (що означає надійніше виробництво електроенергії). Морські бризи можуть бути сильними вдень і ввечері, коли споживчий попит перебуває на піку, тоді як більшість наземних вітрових ресурсів сильніші вночі, коли потреби в електроенергії нижчі. Офшорні турбіни також можна розташувати поблизу центрів навантаження вздовж узбережжя, наприклад у великих містах, усуваючи потребу в нових лініях електропередачі на великій відстані.

За рахунок розташування в разі спрощується перевезення деталей. Завдяки морському транспорту, який має невеликі обмеження щодо вантажу та розмірів у порівнянні з наземним транспортом, морські вітрові турбіни можуть досягати набагато більших розмірів, ніж наземні вітрові турбіни, та більшої одиничної потужності — понад 10 МВт і навіть 15 МВт (на суші нормою є

одинична потужність близько 5 МВт). Водночас встановлення в морі обмежує доступ до БЕУ під час експлуатації, тому елементи ВЕС вимагають вищої надійності, а компоненти розроблені з вищим рівнем резервування, ніж у наземних ВЕС, що значно збільшує вартість станції.

**3. Переваги й недоліки.** Офшорні вітряні електростанції мають багато тих самих переваг, що й наземні вітрові електростанції: вони забезпечують відновлювану енергію; вони не споживають воду; вони забезпечують домашнє джерело енергії; створюють робочі місця; і вони не викидають забруднювальних речовин або парникових газів. При розміщенні в морі візуальний і акустичний вплив дуже малий, тому можна використовувати набагато більші території. Завдяки цьому морські вітроелектростанції зазвичай мають кілька сотень мегават встановленої потужності.

Але в них є й недоліки. Офшорні вітрові електростанції вимагають складнішої інфраструктури для їх підтримки, і, як наслідок, їх будівництво дорожче. Ціни на вітрові турбіни зросли на 30 % у 2021 році, і цей стрибок відчувається в проєктах вже сьогодні — з огляду на приблизно дворічний період між замовленням турбін і фактичним виконанням проєктів [5]. Вищі швидкості вітру, неспокійне море та проблеми з доступністю роблять офшорні вітрові електростанції складнішими в обслуговуванні. Тоді як берегові вітряні турбіни можуть належати місцевим кооперативам чи навіть окремим особам або експлуатуватися ними, офшорні вітряні турбіни вимагають значних інвестицій, тобто вони зазвичай належать корпораціям. Однак вони забезпечують значну кількість робочих місць, що необхідно для сталого розвитку та більшої тривалості роботи вітрової електростанції. Також недоліком є технологічна складність їх будівництва, оскільки конструкції та їх обслуговування складніші через офшорне середовище, яке регулюється суворими вимогами безпеки. Будівництво та експлуатація офшорних ВЕС вимагає використання вузькоспеціалізованих матеріально-технічних ресурсів.

**4. Розташування офшорних ВЕС.** В цей час офшорні вітроелектростанції розташовані на мілководді (глибиною до 60 м) і далеко від узбережжя, шляхів морського руху, стратегічних військово-морських об'єктів і об'єктів, що являють екологічний інтерес.

Відповідно до останнього звіту WindEurope, Європейської вітроенергетичної асоціації, «Офшорний вітер у Європі: тенденції та ключові статистичні дані 2018», опублікованого в лютому 2019 року, європейські ферми мають середню глибину 27,1 м (лише трохи менше, ніж роком раніше) і розташовані на середній відстані 33 км від узбережжя, на відміну від середньої відстані 41 км, зафіксованої у звіті 2017 року.

**5. Типи кріплення.** Зазвичай офшорні вітряні турбіни з нерухомим фундаментом вважаються технічно життєздатними в районах з глибиною води менше 50 м (160 футів) і середньою швидкістю вітру понад 7 м/с (23 футу/с) (рис. 2). Плавучі офшорні вітрові турбіни вважаються технічно життєздатними з глибиною води від 50 до 1000 м (від 160 до 3280 футів).

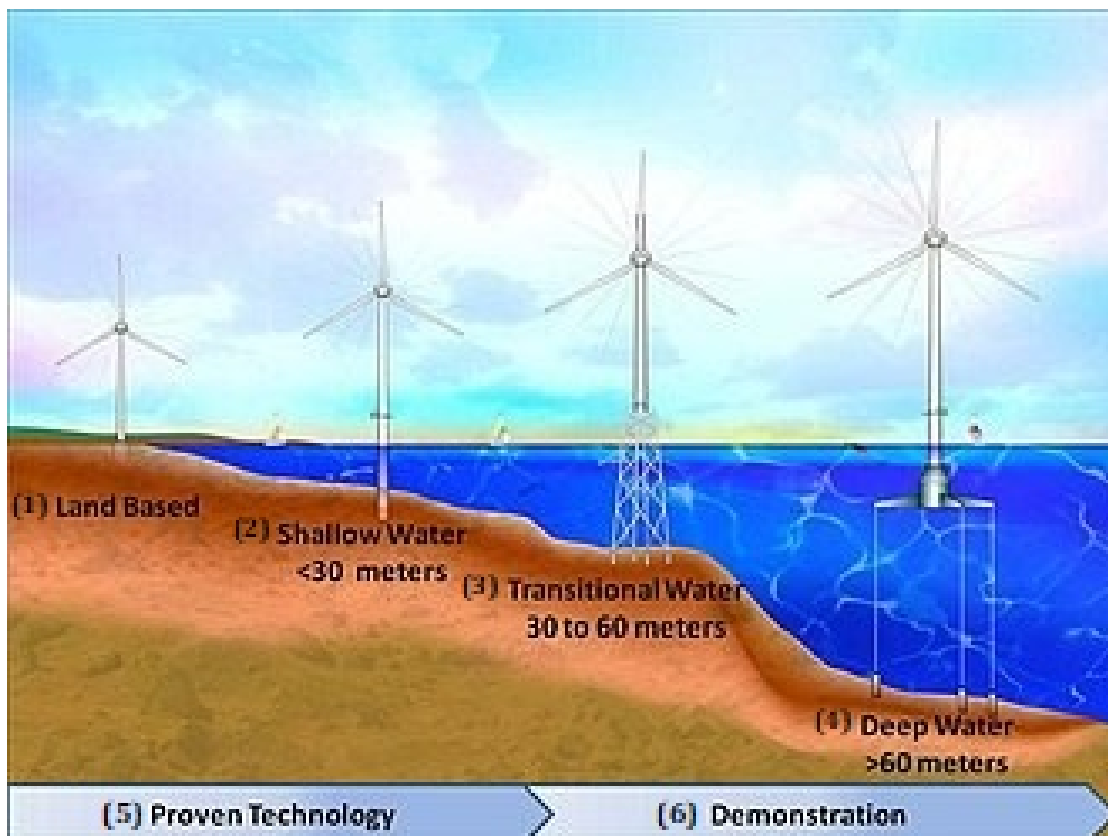


Рис. 2. Різновид фундаментів офшорних ВЕС: 1 – наземна; 2 – мілководдя; 3 – проміжні води; 4 – глибоководдя; 5 – перевірені технології; 6 – демонстраційні

Fig. 2. Types of foundations for offshore wind farms

**Стационарний фундамент.** Майже всі нині діючі морські вітряні електростанції використовують турбіни з фіксованим фундаментом, за винятком кількох пілотних проєктів. Офшорні вітряні турбіни з нерухомим фундаментом під водою встановлюються на відносному мілководді, до 50–60 м (160–200 футів).

Типи підводних фундаментів: монопальний (башта встановлюється на великому сталевому циліндрі, заглибленому в морське дно); з підтримкою сили тяжіння (потрібна велика бетонна або сталева платформа великої площі, яка спирається безпосередньо на підготовлене морське дно); або за допомогою кожухів (сітчастих сталевих конструкцій з трьома або чотирма опорними точками на морському дні). Офшорні турбіни потребують різних типів баз для стабільності, відповідно до глибини води. На сьогодні існує кілька різних рішень:

Більшість фундаментів мають монопальну (одноколонну) основу діаметром 6 м (20 футів), використовуються у водах глибиною до 30 м (100 футів).

Звичайні конструкції зі сталеві оболонки, що використовуються в нафтовій і газовій промисловості, у воді глибиною 20–80 м (70–260 футів).

Гравітаційні базові конструкції для використання на відкритих ділянках у воді глибиною 20–80 м.

Триножні пальові конструкції, у воді на глибині 20–80 м. Триножні всмоктувальні кесонні конструкції, у воді глибиною 20–80 м.

Можуть бути створені монобали діаметром до 11 м (36 футів) при вантажопідйомності 2000 т, але найбільша наразі становить 1300 т, що нижче ліміту в 1500 т для деяких кранових суден. Інші компоненти турбіни набагато менші.

Система опорної конструкції триножних паль є новою концепцією, розробленою для досягнення більшої глибини, ніж для однопальних систем, з можливою глибиною до 60 м. Ця технологія складається з трьох монопаль, з'єднаних між собою у верхній частині. Головною перевагою цього рішення є простота монтажу, яка здійснюється шляхом установки трьох монопаль і подальшого додавання верхнього з'єднання. Більша база також зменшує ризик перекидання.

Конструкція сталеві оболонки походить від адаптації до офшорної вітрової промисловості концепції, які десятиліттями застосовувалися в нафтовій і газовій промисловості. Вони передбачають можливість досягнення більшої глибини (до 80 м). Їх основні обмеження пов'язані з високою вартістю будівництва та монтажу.

Типи стаціонарних фундаментів зображено на рис. 3.

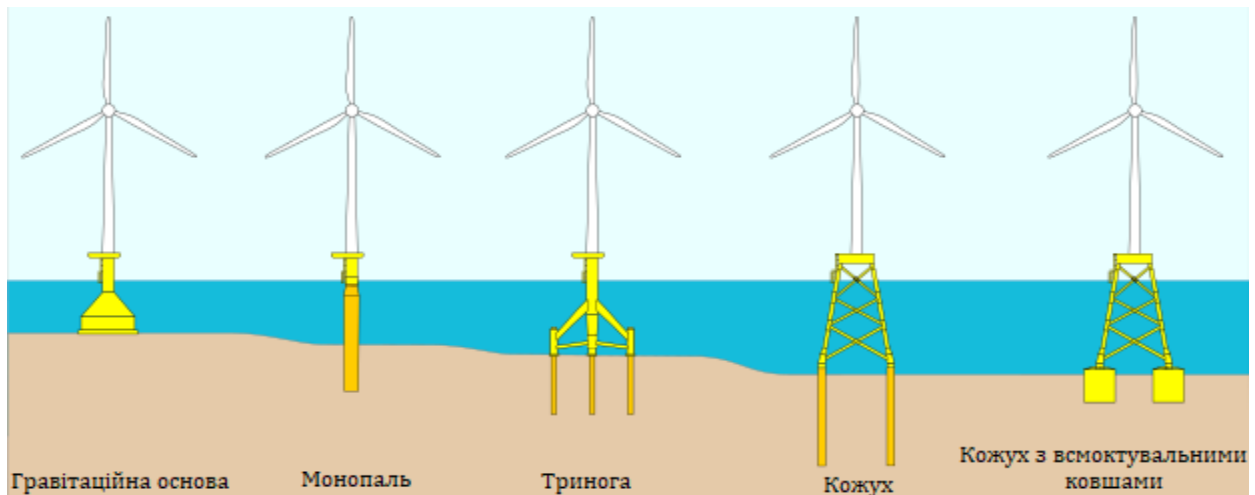


Рис. 3. Типи стаціонарних фундаментів

Fig. 3. Types of fixed foundations

**Плавучий фундамент.** Для місць з глибиною понад 60–80 м стаціонарні фундаменти є неекономічними або технічно нездійсненними, тому потрібні плавучі вітрові турбіни, закріплені на дні океану. Ця технологія дає змогу будувати вітряні електростанції далі від узбережжя в дуже глибоких водах. Плавучі бази дають змогу використовувати величезний потенціал вітру у величезних морських районах. За допомогою цього типу техніки обмеження глибини визначаються прокладанням підводної інфраструктури переміщення електроенергії, яка може бути розташована на сотні метрів нижче рівня моря.

Компанія Blue H Technologies, яку зрештою придбала

Seawind Ocean Technology, встановила першу в світі плавучу вітрову турбіну в 2007 році. Hywind — перший у світі повномасштабний плавучий вітрогенератор, встановлений у Північному морі біля Норвегії в 2009 році. Hywind Scotland, введена в експлуатацію в жовтні 2017 року, є першою діючою плавучою ВЕС потужністю 30 МВт. У подальшому планується розгортання більшої кількості інших типів плаваючих турбін.

Різні компанії розробляють інноваційні плавучі морські вітрові платформи для використання в глибоких водах. Це лонжероновий буй, натяжна ножна платформа, напівзанурена (рис. 4) і баржа. Близько 80 % проєктів планують використовувати напівзанурені платформи.

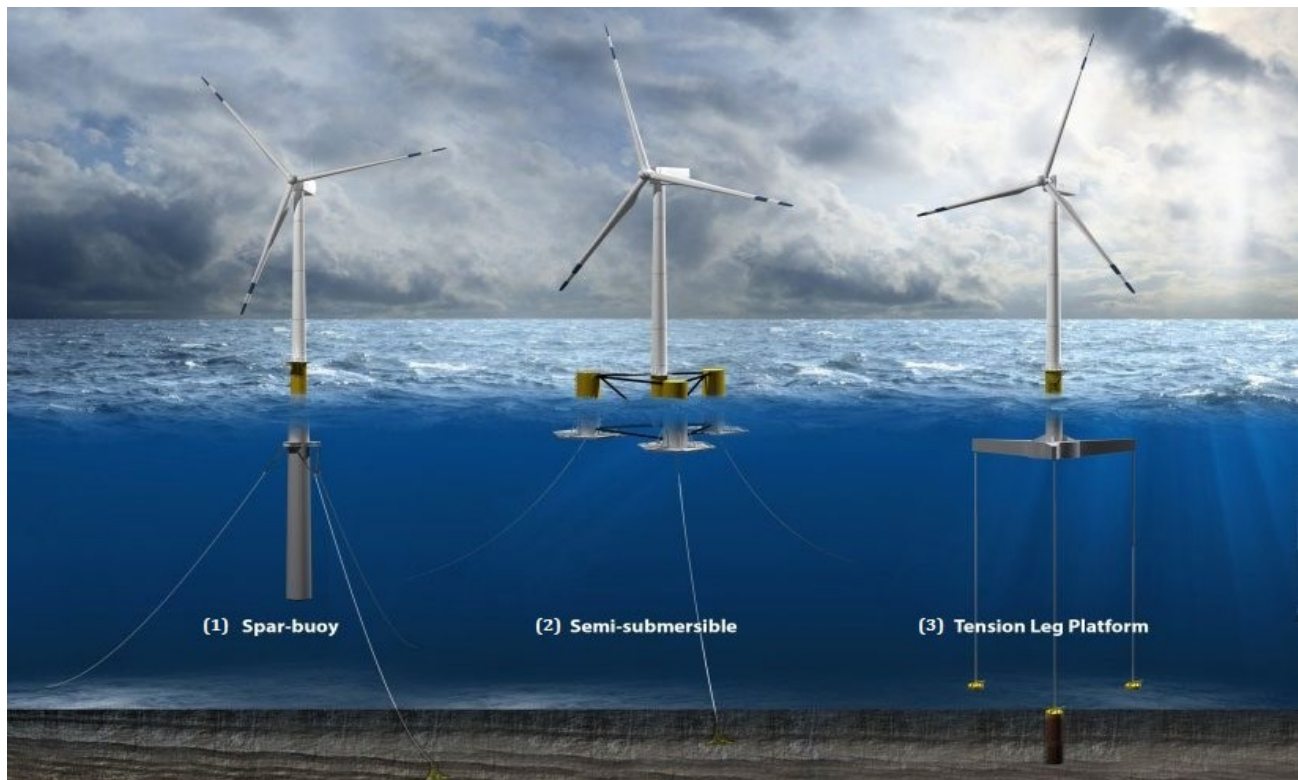


Рис. 4. Типи плавучих фундаментів: 1 – лонжероновий буй; 2 – напівзанурений; 3 – натяжна ножна платформа

Fig. 4. Type of floating foundations

**Вертикальна вісь.** Незважаючи на те, що переважна більшість встановлених наземних і всіх великомасштабних морських вітрових турбін мають горизонтальну вісь, для використання в офшорних установках запропоновано вітрові турбіни з вертикальною віссю. Завдяки офшорній установці та їхньому нижньому центру ваги ці турбіни в принципі можуть бути побудовані більшими, ніж турбіни з горизонтальною віссю, із запропонованими конструкціями потужністю до 20 МВт на турбіну.

#### Висновок

Отже, доцільно розвивати офшорну енергетику в Україні та світі, оскільки з огляду на наведену інформацію можна стверджувати, що офшорна енергетика є надзвичайно ефективною і перспективною. Велика протяжність берегової лінії дає можливість деяким країнам перекрити споживання прибережних територій. Оскільки територія океанів і морів величезна, то місця для розміщення офшорних ВЕС дуже багато, вони не займатимуть землю, яку можна використати під господарство, і не створюватимуть шум населенню. Завдяки відсутності перешкод і легкості транспортування можна встановлювати більші ВЕС, що дають можливість покрити більше потреб системи, а отже, пришвидшити відмову від традиційних джерел електроенергії. Офшорні ВЕС є прекрасним видом ВДЕ, але вони більш вразливі, тому мають бути більше захищені. Багато розвинених країн давно працюють з цим типом ВДЕ, який дедалі більше набуває популярності у світі.

#### ПОСИЛАННЯ

1. Інтернет ресурс - Offshore wind power. Режим доступу:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore\\_wind\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power)
2. Інтернет ресурс - Top 10 Things You Didn't Know About Offshore Wind Energy. Режим доступу:  
<https://www.energy.gov/eere/wind/articles/top-10-things-you-didnt-know-about-offshore-wind-energy>
3. Інтернет ресурс - Onshore vs offshore wind energy: what's the difference? Режим доступу:  
<https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/onshore-vs-offshore-wind-energy#:~:text=Offshore%20wind%20farms%20generate%20electricity,human%20made%20objects%20can%20present.>
4. Інтернет ресурс - СВІТОВИЙ ПРОРИВ ОФШОРНОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ. Режим доступу:  
<http://uwea.com.ua/ua/article/mirovoj-proryv-offshornoj-vetroenergetiki/>

5. Інтернет ресурс - Inflation, interest rates and whales: Why offshore wind projects are on the rocks. Режим доступу:  
<https://edition.cnn.com/2023/07/21/us/offshore-wind-delays-inflation-whales-climate/index.html#:~:text=Offshore%20wind's%20problems%20are%20a,when%20projects%20are%20actually%20built.>
6. Інтернет ресурс - European Offshore Wind Farms Map Public. Режим доступу:  
<https://windeurope.org/intelligence-platform/product/european-offshore-wind-farms-map-public/>

#### REFERENCES

1. Internet resource - Offshore wind power. Access mode:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore\\_wind\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power).
2. Internet resource - Top 10 Things You Didn't Know About Offshore Wind Energy. Access mode:  
<https://www.energy.gov/eere/wind/articles/top-10-things-you-didnt-know-about-offshore-wind-energy>
3. Internet resource - Onshore vs offshore wind energy: what's the difference? Access mode:  
<https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/onshore-vs-offshore-wind-energy#:~:text=Offshore%20wind%20farms%20generate%20electricity,human%20made%20objects%20can%20present.>
4. Internet resource - WORLD WIDE BREAKTHROUGH OF OFFSHORE WIND ENERGY:  
<http://uwea.com.ua/ua/article/mirovoj-proryv-offshornoj-vetroenergetiki/>.
5. Internet resource - Inflation, interest rates and whales: Why offshore wind projects are on the rocks. Access mode:  
<https://edition.cnn.com/2023/07/21/us/offshore-wind-delays-inflation-whales-climate/index.html#:~:text=Offshore%20wind's%20problems%20are%20a,when%20projects%20are%20actually%20built.>
6. Internet resource - European Offshore Wind Farms Map Public. Access mode:  
<https://windeurope.org/intelligence-platform/product/european-offshore-wind-farms-map-public/>.