

ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ: ВІД НАЗЕМНИХ ТУРБІН ДО ПЛАВУЧИХ ОФШОРНИХ СИСТЕМ ТА СТАБІЛЬНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі проведено комплексний аналіз еволюції технологій вітроенергетики з акцентом на переході від традиційних наземних вітрогенераторів із горизонтальною віссю (БЕУ ГВ) до інноваційних плавучих офшорних вітрових турбін. Розглянуто технічні особливості глибоководних систем, які дозволяють використовувати енергію вітру у відкритому морі, де швидкість потоків є значно вищою та стабільнішою. Особливу увагу приділено впливу інтеграції потужних вітрових парків на стабільність енергосистеми та методам компенсації їхньої переривчастої генерації.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроенергетична установка з горизонтальною віссю обертання, вітроенергетична установка з вертикальною віссю обертання, офшорні плавучі системи, аеродинамічна ефективність, енергосистема, стабільність, відновлювані джерела енергії.

Absctract

This article presents a comprehensive analysis of the evolution of wind energy technologies, with an emphasis on the transition from traditional onshore horizontal-axis wind turbines (HAWTs) to innovative floating offshore wind turbines. The study examines the technical characteristics of deep-water systems that enable the harnessing of wind energy in the open sea, where wind speeds are significantly higher and more stable. Particular attention is given to the impact of integrating large-scale wind farms on power grid stability and the methods for compensating for their intermittent generation.

Keywords: Wind energy, horizontal-axis wind turbine, vertical-axis wind turbine, floating offshore systems, aerodynamic efficiency, power grid, stability, renewable energy sources.

Вступ

Вітрова енергетика є потужною технологією, що безупинно вдосконалюється, перетворюючи кінетичну енергію вітру на електрику. Незважаючи на те, що перші спроби генерації струму таким способом фіксувалися ще в кінці XIX століття, справжнім фундаментом глобального «зеленого переходу» ця галузь стала лише протягом останніх двадцяти років. Сьогоднішні вітрогенератори являють собою високотехнологічні аеродинамічні комплекси, принципи роботи яких тісно переплітаються з аерокосмічною інженерією [1].

Результати дослідження

Базова конструкція сучасної установки включає три основні елементи: ротор, гондолу та опорну вежу. Роторна частина найчастіше оснащена трьома лопатями зі склопластику (GFRP), чий аеродинамічний профіль забезпечує необхідну підйомну силу. У середині гондoli сховані ключові механізми — генератор, редуктор та керівна електроніка, тоді як сталева трубчаста вежа бере на себе колосальні механічні навантаження. З точки зору фізики, максимальна ефективність турбіни лімітована законом Беца на рівні 59,3% від кінетичної енергії потоку, проте передові моделі вже сьогодні демонструють вражаючий ККД у межах 45–50% [2].

До ключових переваг галузі належать швидка енергетична окупність та мінімальні витрати на обслуговування. Вже за 6–8 місяців роботи турбіна повністю компенсує ту кількість енергії, яка була витрачена на її виробництво. Оскільки рушійна сила вітру є безкоштовною, це гарантує стабільність цін на електроенергію в довгостроковій перспективі. Додатковою перевагою є гнучка масштабованість систем: від компактних мікротурбін потужністю 1–10 кВт для живлення ізольованих об'єктів до гігантських морських платформ на 15–20 МВт, здатних забезпечувати електрикою великі населені пункти [5].

Відповідаючи на запит щодо екологічності та довговічності, провідні виробники впровадили технологію «Circular Resin» (циклічних смол). Якщо раніше відпрацьовані лопаті майже не піддавалися переробці й поповнювали звалища, то нові епоксидні сполуки дозволяють розщеплювати їх на первинні компоненти. Такий підхід ефективно усуває проблему утилізації відходів, яка тривалий час була слабким місцем вітроенергетики.

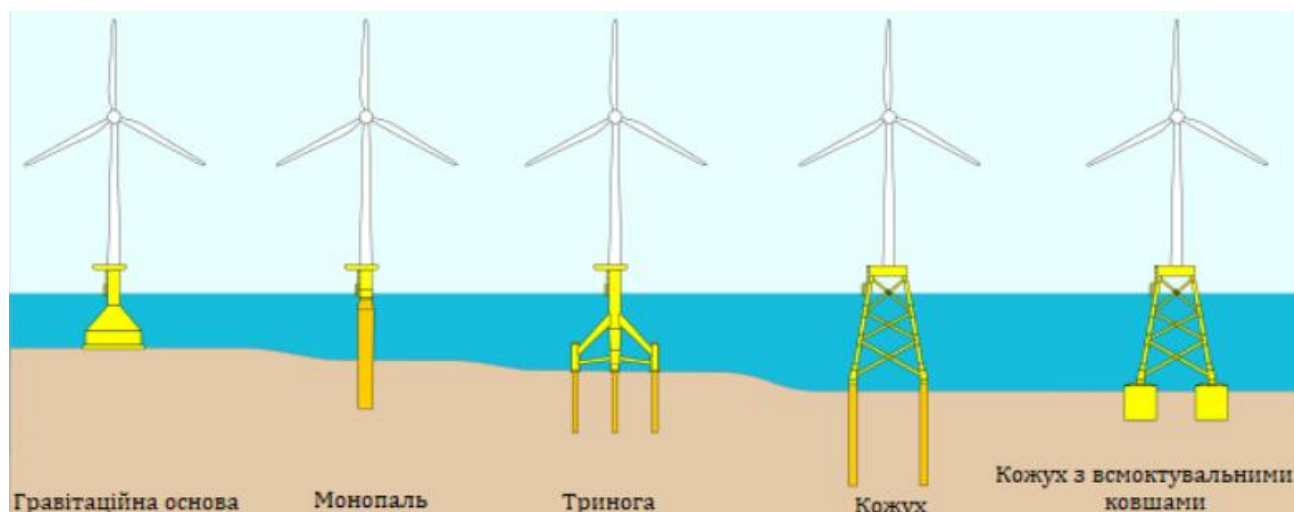


Рис. 1. Типи офшорних вітрогенераторів

Сьогодні спостерігається чіткий вектор розвитку в напрямку офшорних станцій та плавучих конструкцій. На відміну від класичних установок, що потребують мілководдя для жорсткої фіксації на дні, новітні плавучі платформи (наприклад, типу плавучої щогли або напівзанурені) дають змогу виносити турбіни глибоко в океан, де повітряні потоки відзначаються більшою силою та стабільністю. Цей інноваційний крок відкриває можливості для потроєння глобальних потужностей галузі до 2040 року, що особливо актуально для держав із дефіцитом вільних земельних площ. Економічна привабливість вітрової генерації підсилюється оптимізацією витрат та впровадженням інтелектуальних систем керування. Наприклад, технологія Active Pitch Control (активне регулювання кроку) дозволяє динамічно змінювати кут атаки лопатей, що не лише збільшує виробіток енергії, а й захищає обладнання від руйнування під час екстремальних погодних умов. У результаті таких інновацій нормована вартість електроенергії (LCOE) з вітру знизилася орієнтовно на 70% за минулі десять років. Прогнозується, що до 2030 року сумарна світова потужність перетне позначку у 2000 ГВт, роблячи цей ресурс значно вигіднішим за традиційне викопне паливо у переважній більшості регіонів [4].

Критично важливим досягненням в електричній інтеграції вітрових електростанцій є впровадження «Grid-forming (GFM) інверторів» (інверторів, що формують мережу). Традиційно вітрові турбіни працювали в режимі «слідування за мережею» (grid-following), що означало їхню залежність від існуючої напруги та частоти синхронізованої енергосистеми, яку забезпечували масивні турбіни атомних або теплових електростанцій. Однак, із зростанням частки відновлюваних джерел енергії, технологія GFM дозволяє вітровим станціям активно «формувати» та підтримувати мережу. Ця складна силова електроніка може автономно підтримувати рівні частоти та напруги, забезпечуючи «синтетичну інерцію», яка імітує механічне обертання традиційних синхронних генераторів. Така здатність є необхідною для запобігання блекаутам та забезпечення стійкості національної енергосистеми під час переходу від викопного палива [8].

Висновки

Отже, вітрові електростанції є провідною силою у світовому енергетичному секторі. Вони поєднують високу енергоємність із механічною надійністю та дедалі більшою екологічною стійкістю завдяки переробці лопатей. Інноваційні розробки, як-от плавучі платформи та інтеграція енергомереж на базі ШП, значно розширюють експлуатаційний діапазон цих систем. Очікується, що частка вітрової енергії у світі суттєво зросте, що забезпечить децентралізоване та вуглецево-нейтральне енергетичне майбутнє.

Для нашої країни, в акваторії Чорного моря, плавучі системи є ідеальними, оскільки шельф там досить вузький і глибини швидко зростають. Це дозволить нам у майбутньому будувати потужні вітрові хаби подалі від берега, не заважаючи судноплавству та туризму. Реалізація такого потенціалу є критично важливою для повоєнного відновлення енергетичного сектору України. Це не лише забезпечить стійкість нашої національної енергосистеми, але й закріпить статус України як важливого гравця у загальноєвропейському процесі переходу до зеленої енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Electricity Mid-Year Update 2025: report / International Energy Agency. IEA, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-mid-year-update-2025>. (дата звернення: 05.03.2026).
2. Global Wind Report 2025: report / Global Wind Energy Council. GWEC, 2025. URL: <https://www.gwec.net/reports/global-wind-report-2025>. (дата звернення: 05.03.2026).
3. Blade circularity: [corporate website] / Vestas. 2026. URL: <https://www.vestas.com/en/sustainability/blade-circularity>. (дата звернення: 05.03.2026).
4. Recyclable Blade: The world's first recyclable wind turbine blade: [journal article] / Siemens Gamesa Renewable Energy. 2026. URL: <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/explore/journal/recyclable-blade.html>. (дата звернення: 05.03.2026).
5. Renewable Power Generation Costs in 2024: publication / International Renewable Energy Agency. IRENA, 2025. URL: <https://www.irena.org/publications/2025/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>. (дата звернення: 05.03.2026).
6. Global Wind Energy Council (2025). *Global Wind Report 2025: Perspectives on the Energy Transition*. GWEC, Brussels. Available at: <https://gwec.net/global-wind-report-2025/>
7. International Energy Agency (2024). *Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030*. IEA, Paris. Available at: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>
8. ENTSO-E (2025). *High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources (PEIPS): The Role of Grid-Forming Capabilities*. European Network of Transmission System Operators for Electricity, Brussels.

Радченко Ярослав Володимирович – студент групи 2ЕС-226, Факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: referens1234321@gmail.com.

Науковий керівник: **Остра Наталя Вікторівна** – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, м. Вінниця. Email: natalyaotra@ukr.net.

Radchenko Yaroslav V. – student of group 2ES-22b, Faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: referens1234321@gmail.com.

Supervisor: **Ostra Natalia V.** – Cand. Sc. (Eng), Associate Professor of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: natalyaotra@ukr.net