

В. О. Лесько¹
К. Б. Покровський²
Р. Я. Ференсович²

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ З ДОДАТКОВИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВИТРАТАМИ

¹Вінницький національний технічний університет;

²Національний університет «Львівська політехніка»

Розвиток світової енергетики безупинно супроводжується зростанням споживання електроенергії. Традиційні джерела електроенергії в цьому процесі сприяють зростанню парникових викидів та загостренню кліматичних проблем, які з кожним роком стають актуальнішими. На цьому фоні альтернативні джерела електроенергії, зокрема вітрові електростанції, зменшують вплив традиційних джерел та сприяють розв'язанню екологічних проблем. Розвиток вітрової електроенергетики супроводжується зростанням одиничних потужностей вітрогенераторів.

У статті проаналізовано ефективність роботи вітрової електростанції з сучасними вітрогенераторами для визначених умов розташування з урахуванням додаткових експлуатаційних витрат на основі досвіду експлуатації. Проведено розрахунки технічних та економічних показників роботи проєктованої чотириагрегатної вітрової електростанції з різнотипними вітрогенераторами за вітрових умов конкретного промислового майданчика, розташованого в Карпатському регіоні України. При цьому враховано сучасні типові потужності вітрогенераторів та додаткові витрати, що виникають в процесі експлуатації вітроелектростанцій.

З метою прийняття оптимального технічного рішення проєктування для порівняльної оцінки вибрано для встановлення на станції два типи вітрогенераторів — Enercon E-175 EP5 та Vestas V136-4.5 MW.

Для визначеної ділянки розташування проєктованої вітроелектростанції на верхів'ях хребтів Карпат у Львівській області України (координати ділянки — (lat., lon.) 49,2470; 22,8763) розраховано річний розподіл імовірності вітру за аналітичним розподілом Вейбула та відповідно наведено характеристики річної електричної продуктивності проєктованої чотириагрегатної вітроелектростанції для вибраних двох типів вітрогенераторів.

Отримані техніко-економічні показники: капіталовкладення, експлуатаційні витрати, характеристики продуктивності, а також розраховані валові прибутки протягом року експлуатації розглянутої вітроелектростанції з двома варіантами встановлення вітрогенераторів дали змогу оцінити термін окупності її обладнання. Так, для чотириагрегатної станції з вітрогенераторами типу Enercon E-175 EP5 термін окупності становить 3,7 року, а з вітрогенераторами типу Vestas V136-4.5 MW — 3,6 року.

Ключові слова: вітрова електростанція, вітрогенератори, реальні вітрові умови, річний розподіл швидкості вітру, характеристики продуктивності, техніко-економічні показники, термін окупності.

Вступ

Розвиток світової енергетики у показниках встановленої потужності альтернативних відновлюваних джерел електроенергії та обсягів їх виробництва демонструють стабільну позитивну динаміку. Разом із тим вітрова енергетика показує значні темпи зростання впливу на рівень виробництва електроенергії. Неодноразово у 2016—2021 рр. з'являлися повідомлення про використання виключно альтернативних відновлюваних джерел енергії в окремих країнах у періоди зниження графіків навантаження у вихідні та святкові дні [1]. При цьому доля електроенергії, отриманої від гідро-, вітро-, біо- та сонячних електростанцій складала більше 87%. Застосування зокрема вітроелектростанцій (ВЕС) знижує споживання традиційних первинних енергоресурсів, сприяє техно-

логічному розвитку територій та створенню робочих місць, скорочує кількість викидів CO₂ в атмосферу. З розвитком вітроенергетики розвиваються як одиничні потужності вітрогенераторів, так і формується новий досвід експлуатації вітростанцій, що пов'язане з виникненням додаткових факторів, які впливають на загальну ефективність вітроенергетики. Такими факторами є зростання одиничних потужностей вітрогенераторів, так і додаткові витрати вітростанцій [2] на ремонт та запасні частини, а також пов'язана з ними логістика. Цей фактор впливу на ефективність роботи вітростанції слід враховувати під час проектування та планування роботи електростанції для конкретного регіону.

Метою роботи є здійснення оцінки ефективності роботи вітростанції із сучасними вітрогенераторами в умовах конкретної ділянки розташування в Українських Карпатах з урахуванням додаткових експлуатаційних витрат на основі досвіду експлуатації.

Результати дослідження

Наразі українська вітроенергетика демонструє значно менш динамічні показники розвитку, ніж середньосвітові. У 2018 році вітроенергетика України виробили 974 тис. МВт·год електричної енергії, при цьому частка цього виду енергетики у загальному балансі склала 0,62% та 0,9% у встановленій потужності генераторів. Це зменшує викид CO₂ в атмосферу на 490 тисяч тон. У 2021 році встановлена потужність вітрогенераторів сягнула величини у 1673 МВт. Інтенсифікація розвитку генерації в Україні і надалі потребує зменшення залежності від традиційних видів палива та його імпорту, зменшення викидів в атмосферу.

Ефективність ВЕС визначається переліком показників, що вимагають врахування певних факторів для прийняття успішних проектних рішень. Це визначається наявним законодавством, результатами інженерних пошукових робіт, витрат на логістику, особливо в гірських умовах, результатів вивчення вітрового потенціалу, тощо [3], [4]. На ефективність вітростанції також впливають особливі вимоги законодавства щодо «зеленого тарифу», які пов'язані з часткою застосування продукції вітчизняного виробника. Додатково слід врахувати світові тенденції цін на вітрогенератори, що станом на 2021 рік становлять €800...950 тис. за МВт [5].

Під час оцінки експлуатаційних витрат слід врахувати досвід тривалої експлуатації вітростанцій в умовах енергосистеми, що супроводжується додатковими фінансовими витратами на ремонт обладнання. Ці витрати можуть становити орієнтовно до 50% від прямих витрат, що пов'язані з позаплановим ремонтом. Тільки вартість капітальних складових — редукторів, генераторів і лопатей — може становити до €10 000 на турбіну протягом року [2].

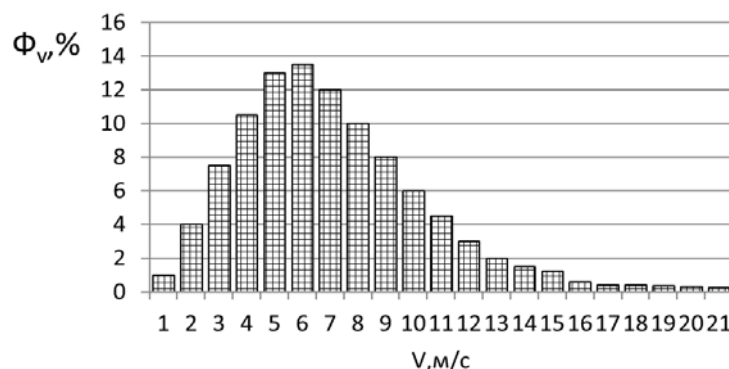
Першим етапом оцінки ефективності роботи вітростанції в реальних умовах саме є характеристики визначеної ділянки для її побудови. Для отримання даних вітрових характеристик для конкретної ділянки на верхів'ях хребтів Карпат у Львівській області України (координати ділянки — (lat., lon.) 49,2470; 22,8763) слід застосувати фактичний розподіл імовірності швидкості вітру за аналітичним розподілом Вейбула, що отримано на основі тривалих вимірювань

$$\Phi_V = \frac{k}{C} \left(\frac{V}{C} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{C} \right)^k \right], \quad (1)$$

де Φ_V — функція розподілу імовірності швидкості вітру, %; k — коефіцієнт розсіяння; C — коефіцієнт масштабу, який визначається за середньою швидкістю вітру, наближено $C = 2V_{\text{ср}}/\pi^{1/2}$;

V — швидкість вітру, що оцінюється, м/с. Таку характеристику вітрових параметрів ділянки отримано з відкритих джерел [3]. В результаті застосування цих даних отримано річний аналітичний розподіл Вейбула вибраної ділянки, показаний рисунку.

Наведені характеристики отримано для висоти вимірювальної вежі у 100 м. Для врахування реальної висоти вітрогенераторів можна скористатися експоненціальним законом Хелмана [6]



Аналітичний розподіл Вейбула зазначеної ділянки

$$V_{h2} = V_{h1} \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^b, \quad (2)$$

де H_2 — висота башти досліджуваного вітрогенератора; H_1 — висота башти, на якій здійснювалися вимірювання; V_{h1} , V_{h2} — відповідні швидкості вітру; b — показник профілю місцевості встановлення вітрогенератора ($b = 0,14 \dots 0,30$).

Інтенсивність розвитку світової вітроенергетики стимулює ринок вітрогенераторів і появу на ньому нових пропозицій виробників цього обладнання з вищими показниками продуктивності.

Вітрогенератори високої потужності від Enercon, Vestas, Alstom, Fuhrländer, Gamesa, Guangdong MingYang тощо, значною мірою різняться між собою і це дає можливість вибору на основі порівняння характеристик. Але остаточний вибір потужності вітрогенератора пов'язаний з оцінкою продуктивності та прибутковості, отже — ефективності в конкретних умовах експлуатації. Станом на сьогодні найсучаснішими потужностями вітрогенераторів є 5,0...7,0 МВт. Розглянемо техніко-економічні показники уявної вітростанції, що розташована на вищезазначеній ділянці. Для розрахунку показників вітростанції виберемо два типи вітрогенераторів — Enercon E-175 EP5 [7] та Vestas V136-4.5 MW [8]. Параметри вибраних вітрогенераторів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри вітрогенераторів

Параметр	Enercon E-175 EP5 № 1	Vestas V136-4.5 MW № 2
Номинальна потужність вітрогенератора, МВт	6,0	7,2
Діаметр ротора, м	175	172
Висота башти, м	160	150
Площа охоплення ротора, м ²	7656	7396

Розрахункова потужність вітрогенератора для конкретного випадку місця установки визначається такими параметрами: швидкістю вітру на висоті осі ротора генератора, густиною повітря, добовими показниками максимуму та мінімуму швидкості вітру [3], [4], [6]

$$P = k\rho V^3 S/2, \quad (3)$$

де k — коефіцієнт ефективності вітротурбіни; ρ — густина повітря на розрахунковій висоті, кг/м³; V — швидкість вітру, м/с; S — площа охоплення вітрового потоку, м².

Характеристики продуктивності прийнятих для аналізу типів вітрогенераторів отримуємо з паспортних даних виробників [7], [8]. Електроенергія, вироблена вітрогенератором, може бути визначена таким чином:

$$E = \int_{v=0}^n \left[\frac{1}{2} \rho S V^3 C_t \Phi_V T \right] dV, \quad (4)$$

де ρ — густина повітря; S — площа вітроколеса; C_t — параметр, який характеризує ефективність використання вітрогенератором енергії вітрового потоку [7], [8].

Для уявної вітростанції з вибраними вітрогенераторами річні показники продуктивності для зазначеної ділянки в умовах гірського хребта з урахуванням аналітичного розподілу Вейбула (1), (2) та отриманих за (3), (4) вітрових характеристик мають такі значення (табл. 2):

Таблиця 2

Характеристики продуктивності

Тип вітрогенератора	Кількість вітрогенераторів	Річне виробництво, МВт-год
Enercon E-175 EP5	4	76608,0
Vestas V136-4.5 MW		91929,6

Отримані показники річної продуктивності вітростанції дають змогу провести наближену оцінку ефективності чотириагрегатної станції в умовах визначеної ділянки для двох типів вітрогенераторів.

Вартість капіталовкладень у спорудження вітростанції можна оцінити на основі експертних оцінок з урахуванням витрат на вітрогенератори вартістю €0,85 млн/МВт [5], вартості проектних робіт — €0,9 млн, ліцензії на генерування — €0,4 млн, вартості землевідведення — €0,26 млн, транспортних, будівельних та налагоджувальних витрат — 15 % вартості вітроустановок.

Експлуатаційні витрати можна орієнтовно оцінити у 8,5 %, зокрема це заробітна плата, диспетчерське обслуговування, амортизаційні відрахування, оренда, інвестиційні відрахування на розвиток територій, податки. Також до експлуатаційних витрат слід віднести суму у €10000 на вітрогенератор протягом року, що визначається необхідністю післяаварійного відновлення устаткування електростанції [2].

Вартість генерованої електроенергії на вітростанціях в Україні визначається «зеленим» тарифом, що затверджується Урядом і становить станом на 25.10.2022 р. 3,5672 грн/кВт·год. На основі річної продуктивності електростанції це уможливило обчислення прибуткової частини.

Результати розрахунку наведених показників та валового прибутку протягом року експлуатації увної електростанції з двома типами вітрогенераторів та термін її окупності подано в табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунку техніко-економічних показників вітроелектростанції

Тип вітрогенератора	Кількість вітрогенераторів на електростанції	«Зелений» тариф на 25.10.2022 р., грн/кВт·год	Капіталовкладення, € тис.	Експлуатаційні витрати, € тис.	Річний прибуток, € тис.	Термін окупності, роки
Enercon E-175 EP5	4	3,5672	25020	677,473	7 499,681	3,7
Vestas V136-4.5 MW			29712	804,967	8 999,618	3,6

Розраховані на основі експертних оцінок техніко-економічні показники вітроелектростанції слід розглядати як оціночні характеристики, які не можуть бути абсолютними через наближеність вихідних даних та використання експертних оцінок та характеристик.

Техніко-економічні показники чотириагрегатної вітростанції показують незначні відмінності від раніше опублікованих практичних результатів роботи вітрової електростанції [9], що дає змогу зробити висновок про подібність отриманих характеристик та можливість застосування оціночних даних по витратній частині та вимірювальних даних про вітрове навантаження визначеної ділянки під вітроелектростанцію.

Слід зауважити, що врахування додаткових експлуатаційних витрат на післяаварійне відновлення вітрогенераторів у обсязі €10000 на турбіну незначно впливає (в межах 5 %) на величину річних витрат на експлуатацію, також і на термін окупності капіталовкладень.

Ухвалення технічного рішення щодо спорудження вітроелектростанції має бути здійснено на основі техніко-економічного обґрунтування будівництва реальної електростанції. Отримані в роботі результати враховують сучасні зміни у нормативній базі та наявний валютний курс і корелюються з результатами реальної вітроелектростанції у подібних умовах, що підкреслює високу ефективність будівництва вітростанції у Карпатському регіоні України.

Висновки

Розрахований у роботі річний розподіл імовірності швидкості вітру для визначеної ділянки розташування проекрованої вітроелектростанції на верхів'ях хребтів Карпат у Львівській області України дав змогу оцінити річні показники електричної продуктивності заданої чотириагрегатної вітростанції для вибраних двох типів вітрогенераторів: Enercon E-175 EP5 та Vestas V136-4.5 MW.

Отримані техніко-економічні показники роботи розглянутої вітроелектростанції, а також розраховані валові прибутки протягом року її експлуатації дали змогу оцінити термін окупності її обладнання. Так, для чотириагрегатної станції з вітрогенераторами типу Enercon E-175 EP5 та Vestas V136-4.5 MW термін окупності становитиме період, менший 4 років, що підтверджує високу ефективність будівництва вітроелектростанції у Карпатському регіоні України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] 2021 at a Glance. © 2022 BP P.L.C. [Electronic resource]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-at-a-glance.pdf>. Accessed: Oct. 27, 2022.
- [2] Unplanned wind turbine repairs to cost industry \$8 billion+ in 2019. Wood Mackenzie LTD, 2019. [Electronic resource]. Available: [https://www.woodmac.com/press-releases/unplanned-wind-turbine-repairs-to-cost-industry-\\$8-billion-in-2019/](https://www.woodmac.com/press-releases/unplanned-wind-turbine-repairs-to-cost-industry-$8-billion-in-2019/). Accessed: Oct. 29, 2022.
- [3] К. Б. Покровський, і М. Ю. Кужелев, «Оцінка ефективності вітроелектростанції на основі даних з відкритих джерел.» *Вісник НУ «Львівська політехніка»*, № 862, Електроенергетичні та електромеханічні системи, с. 123-127, 2016.
- [4] K. Pokrovskiy, O. Mavrin, A. Muzychak, and V. Oliinyk, "Modern wind turbines capacity utilization in real conditions," *Energy Engineering and Control Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 47-50, 2017. <https://doi.org/10.23939/jeecs2017.02.047>.

- [5] Land-Based Wind Market Report: 2022 Edition. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. [Electronic resource]. Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/land-based-wind-market-report-2022-edition> . Accessed: Oct. 30, 2022.
- [6] A. F. Zobaa, R. C. Bansal, *Handbook of Renewable Energy Technology*. World Scientific, 2011.
- [7] ENERCON product overview. ©ENERCON GmbH. August 2016. [Electronic resource]. Available: <https://www.enercon.de/home/>. Accessed: Nov. 2, 2022.
- [8] 4 MW platform. ©Vestas Wind Systems A/S, 2022. [Electronic resource]. Available: <https://www.vestas.com/en>. Accessed: Nov. 2, 2022.
- [9] WPP “Stary Sambir-1” nature does nothing in vain. USELF. [Electronic resource]. Available: http://51.140.218.248/_resources/fileadmin/documents/USELF-2_Launch_Event_Kozytskyi_eng_140627.pdf. Accessed: Nov. 2, 2022.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 14.12.2022

Лесько Владислав Олександрович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: lesko.v.o@vntu.edu.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Покровський Костянтин Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики та систем управління, e-mail: kostiantyn.b.pokrovskiy@lpnu.ua ;

Ференсович Роман Ярославович — канд. техн. наук, асистент кафедри електроенергетики та систем управління, e-mail: roman.y.ferensovych@lpnu.ua .

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

V. O. Lesko¹
K. B. Pokrovskiy²
R. Ya. Ferensovych²

Assessment of the Efficiency of Wind Generators in Real Conditions with Additional Operational Costs

¹Vinnitsia National Technical University;

²Lviv Polytechnic National University

The development of world energy is constantly accompanied by the growth of electricity consumption. Traditional sources of electricity in this process contribute to the growth of greenhouse emissions and the aggravation of climate problems, which are becoming more urgent every year. Against this background, alternative sources of electricity, in particular wind power plants, reduce the impact of traditional sources and contribute to solving environmental problems. The development of wind power generation is accompanied by an increase in the unit capacities of wind generators.

The article analyzes the efficiency of the operation of a wind power plant with modern wind generators for certain location conditions, taking into account additional operating costs based on operating experience. Calculations of the technical and economic operational indicators of the designed four-unit wind power plant with various types of wind generators were carried out. During these calculations the wind conditions of a specific industrial territory for the construction of wind power plant were taken into account. This industrial territory is located in the Carpathian region of Ukraine. At the same time, the modern typical power capacities of wind generators and additional costs during the operation of wind power plants were taken into account.

In order to make the optimal technical design decision for comparative evaluation, two types of wind generators — Enercon E-175 EP5 and Vestas V136-4.5 MW — were selected for installation at the wind power plant.

For the determined location of the wind power plant at the upper reaches of the Carpathian mountain ranges in the Lviv region of Ukraine (coordinates of the area are (lat., lon.) 49.2470; 22.8763), the annual wind probability characteristic was calculated according to the Weibull analytical characteristic. According to these data, in the article the characteristics of an annual electrical productivity of the designed 4-unit wind power plant for the selected two types of wind generators were given.

The obtained technical and economic indicators: the capital investment, operating costs, performance characteristics and calculated gross profits during the year of operation of the considered wind power plant with two types of wind generators — made it possible to estimate the payback period of its equipment. So, for a 4-unit station with wind generators of the Enercon E-175 EP5 type, the payback period is 3.7 years, and with wind generators of the Vestas V136-4.5 MW type — 3.6 years.

Keywords: wind power plant, wind generators, real wind conditions, annual wind speed probability distribution, performance characteristics, technical and economic indicators, payback period.

Lesko Vladyslav O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electrical Power Plants and Systems, e-mail: lesko.v.o@vntu.edu.ua ;

Pokrovskiy Kostiantyn B. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electric Power Engineering and Control Systems, e-mail: kostiantyn.b.pokrovskiy@lpnu.ua ;

Ferensovych Roman Ya. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant of the Chair of Electric Power Engineering and Control Systems, e-mail: roman.y.ferensovych@lpnu.ua