

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-61>

УДК 621.548

КУРАК ВЛАДИСЛАВ

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4303-5671>

e-mail: vk_74@ukr.net

АНДРОНОВА ОЛЕНА

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9597-8068>

e-mail: kev_ku@ukr.net

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

В роботі запропоновано лабораторну методику досліджень енергетичних характеристик і параметрів вітроелектричних установок. Представлено та проаналізовано результати експериментальної апробації запропонованої методики на прикладі вітроелектричної установки надмалої потужності, наголошено на перевагах запровадження цієї методики в учбовий процес підготовки здобувачів вищої освіти, що навчаються за спеціальностями електротехнічного та електроенергетичного напрямків.

Ключові слова: вітроелектрична установка, швидкість повітряного потоку, електрична потужність, лабораторний стенд, методика експерименту.

KURAK VLADYSLAV, ANDRONOVA OLENA

Kherson National Technical University

METHODOLOGY FOR INVESTIGATION OF WIND POWER TURBINE IN LABORATORY CONDITIONS

The development of distributed generation, including renewable energy facilities, is one of the priorities for increasing the stability and reliability of Ukraine's power system. The territory of Ukraine has sufficient potential for the successful commercial development of wind power generation. In this regard, training programs for modern electrical engineering specialists should include educational components related to in-depth study of methods and means to convert wind energy into electrical energy.

In this paper a laboratory methodology for studying the energy characteristics and parameters of wind turbines, which involves artificially created meteorologically independent research conditions, is proposed.

The structure of the laboratory installation and the research methodology are described. The results of experimental testing of the proposed methodology using ultra-small-power wind turbine with a DC generator are presented and analyzed. A power characteristic of the studied wind turbine was built. The minimal air flow speed necessary for the turbine start was estimated from obtained power characteristic. It is shown that the behavior of the obtained power characteristic is fully consistent with the theoretical view on the functional relationship between the turbine's electric power generation and wind speed.

Analysis of the efficiency of wind energy conversion into electricity by the investigated wind turbine depending on the air flow speed made it possible to find out the air velocity providing the maximum efficiency for this turbine. It was pointed out, that in the studied air speeds range the efficiency of the wind turbine was less than 1%, which is explained by the aerodynamic and technical imperfections of the turbine under investigation. Even with such turbine parameters, the implementation of proposed methodology into the educational process will contribute to improving the quality of practical training for higher education students studying on electrical and power engineering.

Keywords: wind power turbine, air flow velocity, electrical power, laboratory installation, experiment methodology.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Курак Владислав, Андронова Олена

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розвиток розподіленої генерації, зокрема, її об'єктів відновлюваної енергетики, є одним з пріоритетів на шляху підвищення стійкості та надійності електроенергетичної системи України [1]. З огляду на це, програми підготовки фахівців для електроенергетичної галузі вже зараз мають враховувати тренди, пов'язані із передбачуваним зростанням встановлених потужностей електростанцій на відновлюваних джерелах енергії, формуючи розуміння їх ролі та впливу на режим роботи об'єднаної електроенергетичної системи [2].

Територія України має достатній потенціал для успішного комерційного розвитку вітрової електричної генерації [3], у зв'язку з чим до програм підготовки сучасних фахівців-електроенергетиків варто включати освітні компоненти, пов'язані з поглибленим вивченням способів та засобів перетворення енергії вітрового потоку в електричну енергію, приділяючи особливу увагу практичній підготовці здобувачів, де важливу роль відіграють лабораторні роботи.

Аналіз досліджень та публікацій

Головною енергетичною характеристикою вітроелектричної установки (ВЕУ) є її робоча характеристика, що демонструє залежність електричної потужності ВЕУ P від швидкості незагальмованого вітрового потоку v [4]. Згідно з [4-6] ця залежність в загальному вигляді може бути описана виразом:

$$P = 0,5C_p \eta_{em} \rho F v^3, \quad (1)$$

де C_p – коефіцієнт використання енергії вітру вітродвигуном; $\eta_{ем}$ – ККД електромеханічних перетворювальних пристроїв (редуктора, генератора); F – площа, що обмітається ротором вітродвигуна, m^2 ; ρ – щільність повітря, kg/m^3 ; v – швидкість повітряного потоку, що набігає на ротор, m/s .

Практична реалізація лабораторних робіт з дослідження енергетичних характеристик вітроустановок може базуватися на трьох підходах [5]:

- натурні випробування зразків ВЕУ, розміщених на спеціалізованих площадках;
- моделювання випробувань із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення, як-то System Advisor Model [7], MATLAB/Simulink [8], тощо;
- застосування лабораторних стендів на основі ВЕУ надмалої потужності, поміщеної в повітряний канал з регульованою швидкістю потоку.

Кожен із зазначених підходів має свої переваги та недоліки з огляду на реалізацію освітнього процесу. Так, незважаючи на повну забезпеченість роботи здобувачів з реальним обладнанням, натурні випробування демонструють суттєву залежність від поточних метеорологічних умов, несприятливості яких здатна унеможливити постановку дослідження. Натомість, робота з віртуальними моделями ВЕУ дозволяє організувати навчальне дослідження в будь-який час та навіть у дистанційному форматі, хоча й позбавляє здобувача можливості роботи з реальним обладнанням, що зменшує ефективність освітнього процесу щодо набуття практичних навичок.

У зв'язку з цим, певним компромісним рішенням виглядає реалізація третього підходу, заснованого на використанні лабораторних стендів, який передбачає штучне створення умов для проведення експериментального дослідження ВЕУ. Цей підхід забезпечує незалежність від поточних метеорологічних умов і, в той же час, надає можливість здобувачу працювати з реальним, хоча й дещо спрощеним обладнанням.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розробка та експериментальна апробація методики дослідження енергетичних параметрів вітроелектричної установки в лабораторних умовах.

Виклад основного матеріалу

Апаратне оформлення лабораторного стенду з дослідження характеристик та параметрів ВЕУ представлено на рис. 1.



Рис. 1. Лабораторний стенд для дослідження ВЕУ: 1 – аеродинамічний канал; 2 – робочий отвір аеродинамічного каналу; 3 – бічний отвір аеродинамічного каналу; 4 – слайдер регулювання повітряного потоку; 5 – досліджуваний зразок ВЕУ; 6 – магазин опорів

Повітряний потік в каналі 1 створюється витяжним вентилятором, розташованим з протилежного до вхідного отвору 2 торця труби. Привід вентилятора здійснюється від асинхронного електродвигуна, що живиться або безпосередньо від трифазної мережі, або через регулятор частоти обертання.

У випадку безпосереднього живлення двигуна від мережі змінного струму витяжний вентилятор забезпечує сталу (номінальну) продуктивність, а регулювання швидкості повітряного потоку через робочий отвір аеродинамічного каналу здійснюється за рахунок зміни площі бічного отвору 3 переміщенням слайдера 4. При регулюванні ж швидкості повітряного потоку за допомогою регулятора частоти обертання вентилятора слайдер 4 залишається закритим, і є, фактично, додатковою опцією для зміни потоку через аеродинамічний канал.

Вимірювання швидкості повітряного потоку в робочій частині аеродинамічного каналу здійснювалось в п'яти точках його поперечного перерізу портативним крильчастим анемометром GM816 з діапазоном вимірювання від 0,1 м/с до 30 м/с та точністю $\pm 5\%$. Дослідним шляхом встановлено, що установка здатна забезпечити швидкість повітряного потоку в каналі до 5 м/с.

В якості досліджуваного зразку (рис. 1, позиція 5) використано ВЕУ надмалої потужності «4М Вітрогенератор», оснащену генератором постійного струму. ВЕУ розміщувалась на кронштейні безпосередньо перед робочим отвором аеродинамічного каналу установки, як показано на рис. 1.

Визначення максимальної електричної потужності, що її генерує досліджувана ВЕУ при фіксованій швидкості набігаючого повітряного потоку, здійснювалось шляхом вимірювання струму I і напруги U в зовнішньому електричному ланцюзі при зміні опору навантаження R_H магазином опорів (рис. 1, позиція 6). В

якості амперметра та вольтметра використовувались цифрові мультиметри DT-832, які забезпечують похибку вимірювання струму та напруги, не гіршу $\pm 0,1\%$. Потужність P знаходили множенням сили струму на відповідну напругу, і за побудованою залежності $P = f(R_H)$ визначали максимальну електричну потужність P_{\max} , що генерується ВЕУ при заданому значенні швидкості повітряного потоку.

В табл. 1 наведено експериментальні значення електричної потужності P_{\max} при низці швидкостей повітряного потоку v , що набігає на вітроколесо ВЕУ. Представлені дані отримано на основі усереднення результатів трьох проведених поспіль дослідів.

Таблиця 1

Максимальна електрична потужність ВЕУ при різних швидкостях повітряного потоку

Параметр	Значення					
	v , м/с	2,1	2,9	3,7	4,1	4,3
P_{\max} , 10^{-3} Вт	6,2	17,1	29,2	37,7	43,0	50,6

На рис. 2 представлено графік залежності максимальної електричної потужності ВЕУ від швидкості повітряного потоку (робоча характеристика ВЕУ), отриманий шляхом апроксимації експериментальних даних поліномом третього степеню з вірогідністю $R^2 = 0,9986$ із залученням засобів MS Excel.

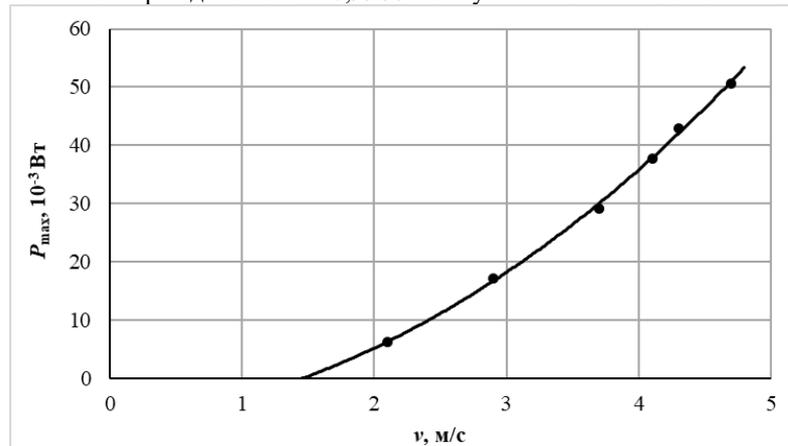


Рис. 2. Залежність максимальної електричної потужності ВЕУ від швидкості повітряного потоку

Характер залежності на рис. 2 корелює з теоретичною уявою про функціональний зв'язок між електричною потужністю ВЕУ та швидкістю вітру у відповідності до виразу (1). Аналіз отриманого графіку дозволяє оцінити стартову швидкість вітру (швидкість зрушення) для досліджуваної ВЕУ, яка працює на узгоджене навантаження. Ця швидкість становить близько 1,5 м/с, що було експериментально підтверджено в серії додаткових дослідів з фіксації швидкості зрушення.

Ефективність η перетворення енергії повітряного потоку в електричну енергію досліджуваною ВЕУ оцінювалась за виразом:

$$\eta = P_{\max}/P_v = P_{\max}/(0,5\rho Fv^3), \quad (2)$$

де P_v – потужність повітряного потоку крізь площину F , що обмітається ротором вітродвигуна, Вт.

При розрахунку за формулою (2) приймалось, що щільність повітря відповідає нормальним умовам і становить $\rho = 1,293$ кг/м³. При радіусі ротора досліджуваної горизонтально осьової ВЕУ $r = 0,2$ м площа, що ним обмітається, знаходиться як площа круга: $F = \pi r^2 = 0,126$ м².

Залежність ефективності ВЕУ від швидкості повітряного потоку представлена на рис. 3.

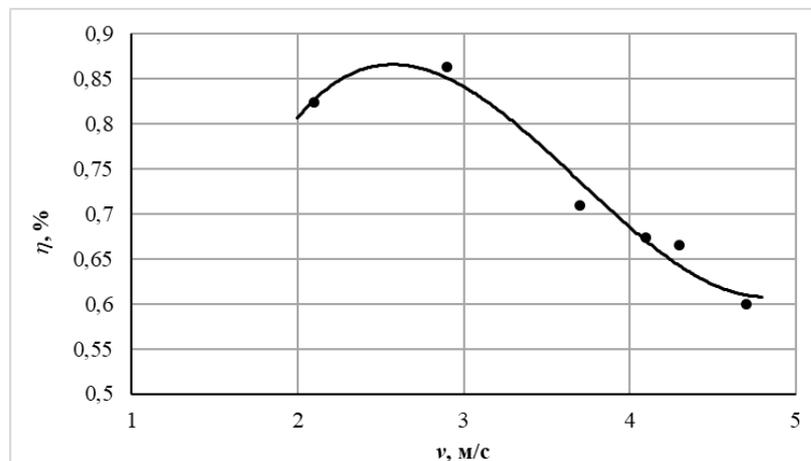


Рис. 3. Залежність ефективності ВЕУ від швидкості повітряного потоку

Аналіз цієї залежності дозволяє знайти швидкість потоку, при якій досягається максимальна ефективність досліджуваної ВЕУ. Ця швидкість становить близько 2,5 м/с. При збільшенні швидкості повітряного потоку понад 2,5 м/с спостерігається падіння ефективності перетворення, що може бути пов'язано з аеродинамічною недосконалістю лопатей ротора досліджуваної ВЕУ та збільшенням втрат енергії в її електромеханічних вузлах. На користь технічної недосконалісті ВЕУ, що досліджувалась, свідчать і малі абсолютні значення ефективності перетворення енергії вітрового потоку, які є меншими 1%. Втім, впровадження розробленої лабораторної методики в учбовий процес навіть за таких показників досліджуваного зразку сприятиме отриманню здобувачами вищої освіти практичних навичок щодо експериментального дослідження характеристики та параметрів ВЕУ, забезпечивши при цьому незалежність від поточних метеорологічних умов.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Запропонована методика лабораторних досліджень енергетичних характеристик та параметрів ВЕУ забезпечує незалежність від зовнішніх метеорологічних умов при постановці експерименту і, водночас, надає можливість застосовувати реальне обладнання в його апаратурному оформленні. Експериментальна апробація розробленої методики показала коректність отриманих результатів, які узгоджуються з теоретичною уявою про залежність від швидкості повітряного потоку таких параметрів ВЕУ, як генерована електрична потужність та ефективність перетворення енергії потоку повітря, що набігає на ротор вітрогенератора.

Впровадження даної методики в учбовий процес сприятиме підвищенню якості практичної підготовки здобувачів вищої освіти, що навчаються за спеціальностями електротехнічного та електроенергетичного напрямів, розширюватиме коло потенційних наукових досліджень в галузі відновлюваної енергетики, в тому числі, із залученням здобувачів освіти.

Література

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. №373-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року» [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. – Верховна рада України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text> – (Дата звернення 14.01.26). – Назва з екрану.
2. Сегеда М.С. Швидкість зміни частоти електроенергетичних систем в результаті збільшення частки генерованої потужності вітровими електричними станціями / М.С. Сегеда, О.Б. Дудурич // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 5. – С. 68-75.
3. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / [за заг. ред. Кудрі С.О.]. – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.
4. Гончаренко Ю.П. Дослідження впливу параметрів вітрового потоку на вибір характеристик автономної вітроелектроустановки / Ю.П. Гончаренко, О.Ф. Соколовський, В.К. Палейчук, С.В. Ключ, І.С. Омаров // Відновлювана енергетика. – 2022. - № 2 (69). – С. 56-64. – DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2\(69\).56-64](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69).56-64).
5. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / С.О. Кудря. – К.: НТУ «КПІ», 2012. – 489 с.
6. Відновлювані джерела енергії: монографія / [за заг. ред. Кудрі С.О.]. – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. – 492 с.
7. System Advisor Model (SAM) [Electronic resource] : [web-site]. – National Laboratory of the Rockies. – Access mode: <https://sam.nrl.gov/> – (Last access 11.02.2026). – Title from the screen.
8. MATLAB and Simulink for Engineered Systems [Electronic resource] : [web-site]. – MathWorks. – Access mode: <https://www.mathworks.com/> – (Last access 11.02.2026). – Title from the screen.

References

1. Rozporядzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 21 kvitnya 2023 r. №373-r «Pro skhvalennya Enerhetychnoy strategiyi Ukrayiny na period do 2050 roku» [Elektronnyi resurs] : [veb-sait]. – Verkhovna rada Ukrayiny. – Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text> – (Data zvernennia 14.01.26). – Nazva z ekrana.
2. Sehed M.S. Shvydkist' zminy chastoty elektroenerhetychnykh system v rezul'tati zbil'shennya chastky henerovanoyi potuzhnosti vitrovymy elektrychnymy stantsiyamy / M.S. Sehed, O.B. Dudurych // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. – 2016. – № 5. – S. 68-75.
3. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi Ukrayiny / [za zah. red. Kudri S.O.]. – K.: Instytut vidnovlyuvanoi enerhetyky NAN Ukrayiny, 2020. – 82 s.
4. Honcharenko Yu.P. Doslidzhennya vplyvu parametriv vitrovoho potoku na vybir kharakterystyk avtonomnoi vitroelektrostanovky / Yu.P. Honcharenko, O.F. Sokolovs'kyi, V.K. Paleychuk, S.V. Klyus, I.S. Omarov // Vidnovlyuvana enerhetyka. – 2022. - № 2 (69). – S. 56-64. – DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2\(69\).56-64](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69).56-64).
5. Kudrya S.O. Netradytsiyni ta vidnovlyuvani dzherela enerhiyi / S.O. Kudrya. – K.: NTU «KPI», 2012. – 489 s.
6. Vidnovlyuvani dzherela enerhiyi: monohrafiya / [za zah. red. Kudri S.O.]. – K.: Instytut vidnovlyuvanoi enerhetyky NANU, 2024. – 492 s.
7. System Advisor Model (SAM) [Electronic resource] : [web-site]. – National Laboratory of the Rockies. – Access mode: <https://sam.nrl.gov/> – (Last access 11.02.2026). – Title from the screen.
8. MATLAB and Simulink for Engineered Systems [Electronic resource] : [web-site]. – MathWorks. – Access mode: <https://www.mathworks.com/> – (Last access 11.02.2026). – Title from the screen.