

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОВОГО ПОТОКУ

В. Ю. Рамш, кандидат технічних наук, доцент

М. В. Потапенко, кандидат технічних наук, доцент

В. Л. Шаршонь, старший викладач

П. М. Дарморіс, старший викладач

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України "Бережанський агротехнічний інститут"

E-mail: m.potapenko19@gmail.com

Анотація. Вітер є відновлюваним та екологічно чистим джерелом енергії на відміну від викопного палива, яке забруднює нижній шар атмосфери. Оцінка характеристик вітрового потоку має важливе значення для забезпечення надійності та ефективності вітроенергетичних систем.

Точне визначення статистичного розподілу швидкості вітру є дуже важливим при оцінці енергетичного потенціалу конкретної місцевості. Ця інформація є необхідна для розробників вітроенергетичних установок, що дозволяє мінімізувати витрати на їх виробництво.

Метою дослідження є аналіз та оцінка енергетичних характеристик вітрового потенціалу.

Моделювання вітрового потенціалу є необхідним як для вибору раціональної структури вітроенергетичної установки, так і для побудови енергоефективних алгоритмів керування режимами роботи генеруючих установок автономної системи електропостачання.

Модель зміни швидкості вітру, складена на основі розподілу Вейбулла, дозволяє вибрати вітроенергетичну установку та якісно оцінити її енергетичні характеристики.

При виборі типу вітроенергетичної установки та розрахунку її річного енерговиробництва не можна виходити тільки із середньорічної швидкості вітру для даної місцевості, необхідно враховувати дані про повторюваність різних швидкостей вітру, які, як правило, апроксимуються функцією розподілу Вейбулла.

Викладено методику визначення параметрів функції Вейбулла, що відображають густину розподілу ймовірностей швидкостей потоку вітру на заданій базовій висоті над поверхнею з використанням доступних даних про середню швидкість на цій висоті та її повторюваність за градаціями. Це важливо для забезпечення стабільності та надійності енергосистеми, оскільки знижується ймовірність перебоїв у подачі електроенергії, забезпечуючи тим самим більш рівномірний розподіл навантаження.

Таким чином, оцінка характеристик вітрового потоку має важливе значення для забезпечення надійності та ефективності вітроенергетичних систем.

Ключові слова: *вітроенергетична установка, вітровий потенціал, швидкість вітру, повторюваність швидкостей вітру, функція розподілу, прогнозування*

Актуальність. Вітер є відновлюваним та екологічно чистим джерелом енергії на відміну від викопного палива, яке забруднює нижній шар атмосфери. Одним із найбільш важливих параметрів вітру є його швидкість. Швидкість вітру є випадковою величиною, тому необхідно використовувати статистичні методи її оцінки [1]. З цього випливає, що можливість розподілу швидкості вітру можна оцінити з використанням статистичних розподілів ймовірностей. Точне визначення статистичного розподілу швидкості вітру є дуже важливим при оцінці енергетичного потенціалу конкретної місцевості. Ця інформація є необхідна для розробників вітроенергетичних установок, що дозволяє мінімізувати витрати на їх виробництво.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо, що для розрахунку середньої потужності необхідно знати розподіл швидкості вітру. При аналізі швидкості вітру протягом року можна побачити, що для більшості регіонів України найбільш поширені є помірні вітри [2]. У свою чергу, статистичний розподіл швидкості вітру завжди варіюється від місця розташування в залежності від кліматичних умов та поверхні ландшафту.

Для систем електропостачання на основі автономних джерел електроенергії виникає проблема визначення енергетичних характеристик вітрового потоку.

Мета дослідження – аналіз та оцінка енергетичних характеристик вітрового потенціалу.

Матеріали і методи дослідження. Найбільш важливою характеристикою вітру, яка визначає інтенсивність і ефективність використання вітрової енергії, є його середня швидкість за певний період часу. Це може бути доба, місяць, рік або навіть декілька років. Середня швидкість вітру може бути визначена як середньоарифметичне значення, отримане з ряду величин швидкостей, одержаних через рівні інтервали часу протягом певного визначеного періоду. При визначенні середніх швидкостей вітру слід враховувати, що вони залежать від конкретних

рельєфних і ландшафтних умов. Для різних географічних територій ці умови можуть суттєво відрізнятися. Тому необхідно привести середні багаторічні спостереження швидкості вітру до порівняльних умов відносно відкритості і рівності місцевості.

Крім зміни параметра випадкової величини – середньої швидкості вітру в залежності від відкритості місцевості та висоти над поверхнею Землі – існує так звана закономірна часова зміна середньої швидкості вітру. Дана зміна обумовлена певним визначеним усталеним характером варіації погодних умов протягом року.

Крім значення середньої швидкості вітру існує ще ряд параметрів, які необхідні для визначення вітрового потенціалу. До таких параметрів можна віднести: максимальну швидкість вітру, кількість послідовних днів (годин), протягом яких швидкість вітру перевищує 5 м/с, тривалість періодів безвітря чи постійного вітру [3]. Швидкість вітру не буває постійною. Через що змінюється і його енергія. Важливим енергетичним параметром є також повторюваність різних градацій швидкості вітру. Цей параметр характеризується як відсоток часу, протягом якого спостерігалася та чи інша градація швидкості вітру. Показник є важливим при розрахунках енергетичних та інших параметрів, необхідних для досліджень, пов'язаних з оцінкою періодів роботи вітроелектростанції при різних швидкостях вітру.

Результати досліджень та їх обговорення. Моделювання вітрового потенціалу є необхідним як для вибору раціональної структури вітроенергетичної установки, так і для побудови енергоефективних алгоритмів керування режимами роботи генеруючих установок автономної системи електропостачання [4].

Головна мета моделювання вітрової активності полягає у прогнозуванні швидкості вітрового потоку. Швидкість вітру на окремих територіях може змінюватися через існуючі перешкоди, рельєф місцевості та сезонні зміни в часі і просторі.

Швидкість вітру може бути представлена у вигляді суми статичної і турбулентної складових:

$$v(t) = v_{\text{сер}} + \Delta v(t), \quad (1)$$

де $v_{\text{сер}}$ – статична складова швидкості вітру, що відповідає середній швидкості вітру за десяти хвилинний інтервал часу; $\Delta v(t)$ – турбулентна складова швидкості вітру, випадковий стаціонарний процес, що описується методами випадкових функцій.

Вибір вітрогенератора визначається електричним навантаженням локально віддаленого об'єкта [5]. При цьому слід врахувати, що не все обладнання включається одночасно. Крім того, можлива неповна кореляція споживання та генерації електроенергії протягом доби. Тому слід передбачити можливість акумулювання надлишку енергії, що генерується при зниженні споживання і використання її в період пікових навантажень.

Основними вихідними даними, які необхідні для вибору вітроенергетичної установки, є загальна річна кількість електроенергії, що споживається об'єктом електропостачання $W_{\text{сп}}$ і середньорічна швидкість вітру $v_{\text{сер}}$ характерна для запланованого місця встановлення електростанції.

Наближено річний виробіток електроенергії вітроенергетичною установкою можна розрахувати за формулою:

$$W_{\text{веу}} = 0,00191 \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_{\text{сер}}^3 \cdot T \cdot C_p \cdot \eta, \quad (2)$$

де ρ – густина повітря, $\rho = 1,225$ кг/м³ при звичайних умовах; R – радіус вітроколеса, м; $v_{\text{сер}}$ – середньорічна швидкість вітру в місці встановлення вітроенергетичної установки, м/с; T – розрахунковий час роботи вітроенергетичної установки на рік, год; C_p – середній коефіцієнт використання енергії вітру; η – коефіцієнт корисної дії вітрогенератора.

Для того щоб забезпечити гарантоване постачання споживачів електроенергією, необхідне виконання такої умови:

$$W_{\text{веу}} \geq W_{\text{сп}}. \quad (3)$$

Для підвищення достовірності розрахунків доцільно використовувати тривалі дані метеорологічних спостережень у місці розміщення вітроенергетичної установки, а також реальні технічні характеристики конкретного вітрогенератора, які визначаються за даними його технічної специфікації.

Однією з найбільш важливих енергетичних характеристик вітрового потоку є повторюваність швидкостей вітру. Ця характеристика показує, яку частину часу за аналізований період переважають вітри, що мають визначену швидкість [6]. У якості градації швидкостей вітру зазвичай вибирають інтервал рівний 1 м/с. Повторюваність швидкостей вітру значною мірою впливає на ефективність використання вітроенергетичної установки.

Середня швидкість вітру для одержаної вибірки може бути визначена за виразом:

$$v_{\text{сер}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i. \quad (4)$$

де n – загальна кількість вимірювань швидкості вітру у вибірці; v_i – поточне середнє значення швидкості вітру, м/с.

Після визначення середньої швидкості вітру за виразом (4) можна знайти наближений радіус вітроколеса, за яким в подальшому проводиться вибір конкретної моделі вітроенергетичної установки.

Для виконання достовірного прогнозування енергетичної ефективності вітрового потоку необхідно, щоб експериментальні дані про швидкість вітру були апроксимовані стандартною функцією розподілу [7]. Для цього можна застосувати функцію Вейбулла:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{\gamma}}, \quad (5)$$

де $F(v)$ – функція інтегральної повторюваності швидкості вітру, що характеризує ймовірність того, що швидкість вітру рівна або нижча значення v . c – параметр масштабу; γ – параметр форми.

Густина розподілу може бути визначена виразом:

$$\rho(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \frac{\gamma}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{\gamma}}. \quad (6)$$

Знаючи розподіл густини ймовірності повторення швидкостей вітру, на основі стандартної функції розподілу, досить просто розрахувати ймовірність повторення вітру в будь-якому інтервалі швидкостей:

$$P(v_1 < v < v_2) = F(v_2) - F(v_1) = e^{-\left(\frac{v_1}{c}\right)^{\gamma}} - e^{-\left(\frac{v_2}{c}\right)^{\gamma}}. \quad (7)$$

Тоді середньорічну кількість енергії, що виробляється вітрогенератором, можна розрахувати за формулою:

$$W_{\text{вєу}} = T \sum_{i=1}^m P_i(v) \cdot N_i(v), \quad (8)$$

де m – кількість градацій швидкостей вітру; $P_i(v)$ – повторюваність швидкості даної градації; $N_i(v)$ – вихідна потужність вітрогенератора в даній градації швидкості вітру (визначається за робочою характеристикою вітроенергетичної установки як середнє для даної градації).

Як правило, метеорологічні станції реєструють параметри вітру на стандартній висоті 10 м [8]. Осі вітроколес малих вітроенергетичних установок, в основному знаходяться на висотах від 5 до 50 м. Для того щоб визначити середню швидкість вітру на цих висотах v_h , можна застосувати наближену емпіричну формулу, в яку входить значення стандартної швидкості вітру v_{10} , яке визначене на висоті десять метрів:

$$v_h = v_{10} \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^\alpha, \quad (9)$$

де α – степеневий коефіцієнт, який враховує шорсткість земної поверхні.

Модель зміни швидкості вітру, складена на основі розподілу Вейбулла, дозволяє вибрати вітроенергетичну установку та якісно оцінити її енергетичні характеристики.

Однак знання закону розподілу та наявність високих середніх значень швидкостей вітру ще не гарантують його ефективного використання. У вітроенергетиці велике значення має знання можливої тривалості безвітря, ймовірнісна оцінка якого є основним критерієм ефективності використання вітрової енергії. Безвітрям вважається період так званих неактивних швидкостей вітру, які можуть бути використані для виробництва енергії. Ця характеристика, яка є необхідною складовою вітроенергетичного кадастру, вважається однією з найважливіших в оцінці перспектив використання вітру.

Можна вважати встановленим, що структурні властивості вітрового режиму слабо залежать від загального рівня інтенсивності, тобто в місцевостях зі значними

вітрами можуть спостерігатися тривалі періоди безвітря, які роблять використання вітру неефективним.

Висновки і перспективи. При виборі типу вітроенергетичної установки та розрахунку її річного енерговиробництва не можна виходити тільки із середньорічної швидкості вітру для даної місцевості, необхідно враховувати дані про повторюваність різних швидкостей вітру, які, як правило, апроксимуються функцією розподілу Вейбулла.

Ця методика дозволяє визначити густину розподілу ймовірностей швидкостей потоку вітру на заданій базовій висоті над поверхнею з використанням доступних даних про середню швидкість на цій висоті та її повторюваність за градаціями. Це важливо для забезпечення стабільності та надійності енергосистеми, оскільки знижується ймовірність перебоїв у подачі електроенергії, забезпечуючи тим самим більш рівномірний розподіл навантаження.

Таким чином, оцінка характеристик вітрового потоку має важливе значення для забезпечення надійності та ефективності вітроенергетичних систем.

Список використаних джерел

1. Manwell J. F., McGowan J.G., Rogers A.L. Wind energy explained: theory, design, and application. WILEY, 2009. 700 p.
2. Дмитренко Л. В., Барандіч С.Л. Вітроенергетичні ресурси в Україні. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2007. Вип. 256. С. 166-173
3. Васько П.Ф. Розрахунок показників технічної ефективності застосування вітроелектричних установок за результатами строкових вимірювань швидкості вітру. *Технічна електродинаміка*. 2001. №6. С. 45 – 49.
4. Кузнецов М. П. Моделювання параметрів роботи енергосистеми, які носять випадковий характер. *Відновлювана енергетика*. 2012. № 3. С. 5–9.
5. Кузнецов М. П. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії: монографія. К.: ІВЕ, 2022. 142 с.
6. Carta J. A., Ramirez P., Bueno C. A joint probability density function of wind speed and direction for wind energy analysis. *Energy Conversion and Management*. 2008. V.49. P.1309–1320
7. Костогрізова Н. О., Дубровська В. В., Шкляр В. І. Статистичний аналіз результатів виміру швидкостей вітру. *Енергетика*. 2014. № 2. С. 52-57.
8. Прокопенко В. В. Енергетичний аудит з прикладами та ілюстраціями. К.: Освіта України, 2016. 438 с.

References

1. Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L. (2009). Wind energy explained: theory, design, and application. WILEY, 700.
2. Dmytrenko, L. V., Barandich, S.L. (2007). Vitroenerhetychni resursy v Ukraini [Wind energy resources in Ukraine]. Naukovi pratsi UkrNDHMI, 256, 166-173.
3. Vasko, P.F. (2001). Rozrakhunok pokaznykiv tekhnichnoi efektyvnosti zastosuvannya vitroelektrychnykh ustanovok za rezultaty strokovykh vymiriuvan shvydkosti vitru [Calculation of technical efficiency indicators for the use of wind power plants based on the results of real-time wind speed measurements]. Tekhnichna elektrodynamika, 6, 45-49.
4. Kuznietsov, M. P. (2012). Modeliuvannya parametriv roboty enerhosystemy, yaki nosiat vypadkovyi kharakter [Modeling of power system operation parameters that are random in nature]. Vidnovliuvana enerhetyka, 3, 5-9.
5. Kuznietsov, M. P. (2022). Osoblyvosti kombinovanykh enerhosystem z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii: monohrafiia [Features of combined energy systems with renewable energy sources: monograph]. Kyiv: IVE, 142.
6. Carta, J.A., Ramirez, P., Bueno, C. (2008). A joint probability density function of wind speed and direction for wind energy analysis. Energy Conversion and Management, 49, 1309-1320.
7. Kostohrizova, N. O., Dubrovska, V. V., Shkliar, V. I. (2014). Statystychnyi analiz rezultativ vymiru shvydkosti vitru [Statistical analysis of wind speed measurement results]. Enerhetyka, 2, 52-57.
8. Prokopenko, V. V. (2016). Enerhetychnyi audyt z prykladamy ta iliustratsiiamy [Energy audit with examples and illustrations]. Kyiv: Osvita Ukrainy, 438.

ASSESSMENT OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE WIND FLOW

V. Ramsh, M. Potapenko, V. Sharshon, P. Darmoris

Abstract. *Wind is a renewable and environmentally friendly source of energy, unlike fossil fuels that pollute the lower atmosphere. Assessment of wind flow characteristics is essential to ensure the reliability and efficiency of wind power systems.*

Accurate determination of the statistical distribution of wind speed is very important in assessing the energy potential of a particular area. This information is necessary for developers of wind power installations, which allows minimizing the costs of their production.

The purpose of the study is to analyze and evaluate the energy characteristics of wind potential.

Wind potential modeling is necessary both for choosing a rational structure of a wind power plant and for building energy-efficient algorithms for controlling the operating modes of generating units of an autonomous power supply system.

A model of wind speed changes based on the Weibull distribution allows you to select a wind power installation and qualitatively assess its energy characteristics.

When choosing the type of wind power plant and calculating its annual energy production, one cannot proceed only from the average annual wind speed for a given

area, but must take into account the data on the repeatability of different wind speeds, which are usually approximated by the Weibull distribution function.

A method for determining the parameters of the Weibull function, which reflect the probability density distribution of wind flow speeds at a given base height above the surface, using available data on the average speed at this height and its repeatability by gradations, is presented. This is important for ensuring the stability and reliability of the power system, as it reduces the likelihood of power outages, thereby ensuring a more even distribution of the load.

Thus, the assessment of wind flow characteristics is essential to ensure the reliability and efficiency of wind power systems.

Key words: wind power installation, wind potential, wind speed, repeatability of wind speeds, distribution function, forecasting