УДК 621.327

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОВОГО ПОТОКУ НА ВИБІР ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТОУСТАНОВКИ

Отримано 22 лют. 2022; рекомендовано до публікації 6 черв. 2022
Доступно онлайн 30 черв. 2022

Ю. П. Гончаренко[1], О. Ф. Соколовський[2], В. К. Палейчук[3], С. В. Клюс[4], І. С. Омаров[5]

Автор для кореспонденції: Іван Омаров
e-mail: omarov.ivan@gmail.com

Завдяки екологічним перевагам вітрові технології та їх широке застосування є одним із перспективних сучасних напрямів генерації електричної енергії. У роботі представлено результати теоретичних і прикладних досліджень щодо впливу параметрів вітрового потоку регіону Полісся на вибір характеристик автономної системи електропостачання на основі вітроелектричної установки.

Зокрема, виведено аналітичні залежності для визначення: потужності вітрового потоку, коефіцієнта використання енергії вітру, електричної потужності, що розвивається вітроенергетичною установкою, та середньорічної кількості часу роботи установки.

Прикладні дослідження відображені в графічній залежності коефіцієнта використання енергії вітру від швидкохідності вітрового колеса та залежності потужності вітроенергетичної установки і коефіцієнта використання енергії вітру від швидкості вітру. Також відповідно до номограми розподілу середньої швидкості вітру по місяцям за період з 2011 до 2021 року та відповідно до номограми щомісячної частини вітрів, придатних для потреб вітроенергетики, обґрунтовано вибір вітроелектричної установки малої потужності.

Використовуючи методи статистичного розподілу, а саме розподіл Релея, нормальний розподіл, за середнім значенням параметра (швидкість вітру) та емпіричну функцію розподілу, досліджено щільність імовірності швидкості вітру. Встановлено, що застосування розподілу Релея дозволяє підвищити точність обчислення на 18,8 % і 36 % в порівнянні з нормальним розподілом і розрахунком за середнім значенням швидкості вітру відповідно. За 100 % було прийнято значення енергії, отримане розрахунком за емпіричними даними. Під час розрахунків мали місце похибки, спричинені нерівномірністю добового використання енергії споживачем та імпульсним характером надходження енергії. З метою уникнення зазначених похибок надалі рекомендовано використовувати математичне та комп'ютерне моделювання.

Отримані розрахунки параметрів елементів системи автономного електропостачання на основі вітроенергетичної установки, адаптованої до характеристик вітрового потоку регіону Полісся, свідчать про можливість забезпечення в даному регіоні надійного та безперебійного постачання споживачам електричної енергії.

***Ключові слова**: вітроенергетична установка, електроенергія, вітровий потік, автономна система*

[1] завідучий кафедрою, канд. техн. наук, доцент, кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології, Поліський національний університет, Житомир, Україна https://orcid.org/0000-0001-5018-5312

[2] канд. техн. наук, доцент, кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології, Поліський національний університет, Житомир, Україна https://orcid.org/0000-0001-8440-7462

[3] канд. техн. наук., доцент, кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології, Поліський національний університет, Житомир, Україна https://orcid.org/ 0000-0003-2587-8314

[4] канд. техн. наук., завідувач відділу відновлюваних органічних енергоносіїв, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, Україна https://orcid.org/0000-0002-5804-4925

[5] аспірант, відділ відновлюваних органічних енергоносіїв, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, Україна https://orcid.org/0000-0001-9449-853X

© Ю. П. Гончаренко та ін. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69)847

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE WIND FLOW ON THE CHOICE OF THE CHARACTERISTICS OF THE AUTONOMOUS WIND TURBINE

Received 22 Feb. 2022; accepted 6 June 2022.
Available online 30 June 2022

Yuriy Gonsharenko[1], Oleh Sokolovskyi[2], Volodymyr Paliichuk[3], Sergiy Klyus[4], Ivan Omarov[5]

Author for correspondence: Ivan Omarov
e-mail: omarov.ivan@gmail.com

[1] Head of the department, PhD, associate professor, Department of Electrification, Production Automation and Environmental Engineering, Polissia national university, Zhytomyr, Ukraine https://orcid.org/0000-0001-5018-5312

[2] PhD, associate professor, Department of Electrification, Production Automation and Environmental Engineering, Polissia national university, Zhytomyr, Ukraine https://orcid.org/0000-0001-8440-7462

[3] PhD, associate professor, Department of Electrification, Production Automation and Environmental Engineering, Polissia national university, Zhytomyr, Ukraine https://orcid.org/ 0000-0003-2587-8314

[4] PhD, Head of the department of Renewable Organic Energy, Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine https://orcid.org/0000-0002-5804-4925

[5] postgraduate student, department of Renewable Organic Energy, Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine https://orcid.org/0000-0001-9449-853X

Due to ecological advantages wind technologies and theirs wide application is one perspective modern direction of power generation. In the paper presented the results of theoretical and practical investigations about the influence of the wind flow parameters in the Polissya region on the choice of the characteristics of the autonomous electric supply based on the wind turbine.

In particular, the analytical dependencies are deduced for definition of: the power of the wind flow, the coefficient of the wind energy utilization, the produced electric power of the wind turbine and the yearly operation time of the installation.

The practical investigations are shown in graphical dependencies of the coefficient of the wind energy utilization from the speed of the turbine rotor and dependencies of the wind turbine power capacity and the wind-to-rotor efficiency from the wind speed. Also, according to the mean wind speed distribution over the months nomogram (years 2011 to 2021) and according to monthly part of the wind suitable for wind energy, the choice of the of the low power wind turbine is substantiated.

Using the method of statistical distribution, namely the Rayleigh distribution, normal distribution, by the mean value (wind speed) and the empirical distribution function the wind speed probability density. It is defined that use of the Rayleigh distribution makes possible to raise the calculation precision by 18.8 % and 36 % compared to normal distribution and to the mean wind speed value accordingly. As a 100 % the value calculated from empirical data was accepted. During the calculations there were errors because of unevenness of power consumption and the pulsing nature of power delivery. To avoid those errors, in future, it is recommended to use mathematical and computer modeling.

The received calculation of the parameters of the system`s elements of the autonomous power supply based on the wind turbine adapted to the characteristics of the Polissya wind flow, evidence the possibility of providing the reliable and uninterrupted power supply in this region.

Keywords: *wind turbine, electric energy, wind flow, autonomous electric supply*

Вступ. З огляду на те, що в промисловому, аграрному та побутовому секторах попит не електричну енергію стрімко зростає, запаси викопного палива постійно скорочуються, що робить їх дедалі дефіцитнішими. Для поновлення запасів енергії, зокрема електричної, все частіше використовують альтернативні ресурси, такі як енергія сонця, вітру, гідро- та геотермальна енергія [1–4].

Протягом останнього десятиліття потужного розвитку набули як системи автономного електропостачання споживачів на основі одного джерела енергії [2, 5], так і гібридні системи, які можуть використовувати одне й більше джерел відновлюваної енергії і здатні працювати як в автономному режимі, так і в режимі підключення до мережі [4, 6, 7]. Кожна система має свої переваги та недоліки. Гібридна система характеризується високою ефективністю та стабільністю щодо електропостачання [6, 7], тоді як система автономного електропостачання споживачів на основі одного джерела енергії є відносно простою за конструкцією, легкою під час монтажу та експлуатації, доступною з економічної точки зору [2].

Використання різних видів систем залежить від потреб в електроенергії та доступності ресурсів у конк-

© Ю. П. Гончаренко та ін. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69)847

ретному регіоні. Представлені дослідження виконані для регіону Полісся, де активність вітру є вищою порівняно з сонячною, тому основна увага приділена саме автономній системі електропостачання на основі вітроенергетичної установки (ВЕУ).

Оптимізація параметрів складових частин системи автономного електропостачання на основі вітроенергетичної установки створює передумови для надійного і безперебійного електропостачання споживачів [8, 9]. Параметри елементів даної системи (вітрової турбіни, генератора, акумуляторної батареї, інвертора, контролера тощо) залежать від вітрового навантаження та графіка споживання електричної енергії. Така система може задовольнити основні вимоги щодо електроенергії в неелектрифікованих віддалених районах (сільська місцевість), де електроенергія в мережі недоступна, або в невеликих населених пунктах міського типу, де мережа пошкоджена. Надлишок генерованої ВЕУ енергії дасть змогу заряджати батарею, а коли виробленої потужності буде недостатньо, батарея компенсуватиме нестачу.

Існують певні обмеження у виборі методів проєктування та оптимізації існуючих конструкцій ВЕУ, які залежать не лише від доступності ресурсів, а й від технологій, ефективності, а також методу математичного моделювання. Сучасний рівень обчислювальної техніки дозволяє легко вирішувати питання оптимізації за допомогою низки відповідних методів та моделей [10]. Для оптимізації, проєктування та оцінки продуктивності ВЕУ може бути використана оптимізаційна модель відновлюваної електроенергії, імітаційна модель енергетичної системи, гібридна оптимізація з використанням генетичного алгоритму тощо [11, 12]. Зрозуміло, що використання вказаних моделей також має певні обмеження, як-от написання кодів до чорного ящика, робота з різними робочими платформами, недоступність деяких програм, недостатня гнучкість щодо критеріїв дослідження. Тому, на думку авторів [13, 14], правильний вибір моделі й, відповідно, методу оптимізації ВЕУ є досить складною задачею.

Методи визначення геометричних розмірів ВЕУ та методи оптимізації конструкції стали інструментами для пошуку оптимальної комбінації таких параметрів, як вартість і надійність системи, розмір вітрової турбіни й висота її встановлення, оскільки необґрунтоване збільшення розмірів спричиняє великі непродуктивні втрати системи, а недостатній розмір не забезпечує потрібної потужності. Ряд авторів провели детальні огляди методів визначення розмірів та оптимізації [15–17], зокрема одним з критеріїв оптимізації є такий параметр, як щільність імовірності швидкості вітру. Для цього рекомендується використовувати: нормальний розподіл, розподіл Релея та емпіричну функцію розподілу [18]. Також, виходячи із заданих параметрів вузлів ВЕУ, характеристик роботи (час, величина струму, напруга), а також ступеня забезпечення ВЕУ необхідного споживання мережі, визначаються параметри надійності електропостачання.

Мета і завдання. Метою роботи є дослідження впливу параметрів вітрового потоку регіону Полісся на вибір характеристик автономної системи електропостачання на основі вітроенергетичної установки.

Об’єкт дослідження – процес виробництва енергії автономною системою електропостачання на основі ВЕУ.

Предмет дослідження – залежності впливу параметрів ВЕУ, адаптованої до характеристик вітрового потоку регіону Полісся, на потужність та кількість виробленої нею електроенергії.

Завдання дослідження:

Навести аналітичні залежності для визначення раціональних параметрів складових частин системи автономного електропостачання на основі вітроенергетичної установки.

За статистичними даними середньої швидкості вітру в регіоні Полісся та встановленої частини вітрів, придатної для потреб вітроенергетики, довести доцільність та визначити ефективність використання автономної системи електропостачання на основі ВЕУ.

Виконати моделювання вітрового навантаження регіону Полісся.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводилися з використанням основних положень фізики, електротехніки, електромеханіки, теорії електричних кіл, основних положень проєктування систем електропостачання тощо. Для обґрунтування параметрів ВЕУ використано статистичні дані середньої швидкості вітру в регіоні Полісся й дані щодо встановленої частини вітрів, придатної для потреб вітроенергетики. Дані збиралися відповідно до прийнятої методики і галузевих стандартів із застосуванням вимірювального обладнання лабораторій Поліського національного університету. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана із застосуванням положень математичної статистики, при цьому використано прикладну програми Statistica 6.1.

Результати дослідження. Відмічаємо, що всі розрахунки щодо можливості використання енергії вітру здійснюються за умови виробництва максимальної кількості енергії ВЕУ.

© Ю. П. Гончаренко та ін. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69)847

Потужність повітряного потоку визначаємо з математичної залежності, Вт [8]:

$$P = \rho \frac{V^3 S}{2}, \quad (1)$$

де S – площа поперечного перерізу вітрового потоку, м^2;

V – швидкість вітру, м/с;

ρ – щільність потоку повітря, кг/м^3.

Щільність потоку повітря залежить від тиску й температури і виражається в кілограмах на кубічний метр. Якщо середня щільність потоку повітря в розглядуваному випадку відрізняється від щільності потоку повітря за стандартних умов, то це слід враховувати під час визначення кількості виробленої енергії вітроустановкою.

Будь-який вітродвигун характеризується коефіцієнтом використання енергії вітру ξ, який визначається як відношення механічної потужності на валу вітроколеса $P_{вк}$ до потужності вітрового потоку P [9]:

$$\xi = \frac{P_{вк}}{P}, \quad (2)$$

де ξ – коефіцієнт використання енергії вітру.

Коефіцієнт використання енергії вітру визначає максимальну кількість частини енергії вітрового потоку, яка може бути використана вітровою турбіною. Максимальне значення коефіцієнта потужності вітроколеса залежить від його швидкохідності й може досягати теоретичного максимуму, рівного 0,593. Таке значення вперше було обчислено Бетцом. На рис. 1 представлено залежність коефіцієнта використання енергії вітру від швидкохідності вітроколеса для автономного ВЕУ номінальною потужністю 20 кВт

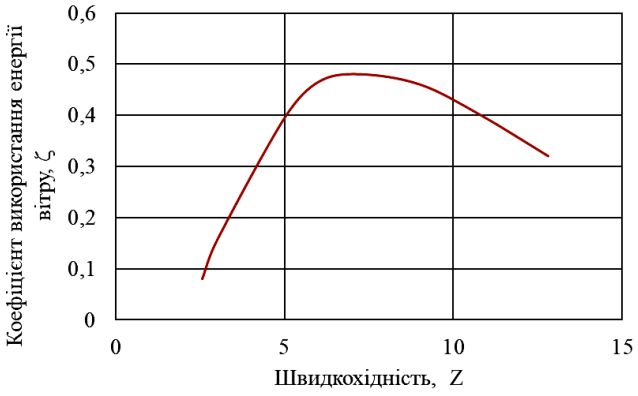


Рис. 1. Залежність коефіцієнта використання енергії вітру від швидкохідності вітроколеса

Fig. 1. The dependence of the air-to-rotor ratio from the speed of the rotor

Враховуючи (1) можна вважати, що коефіцієнт використання енергії вітру є функцією швидкості вітрового потоку, тобто:

$$\xi = \xi(V). \quad (3)$$

Основними типами вітродвигунів, які мають практичне застосування, є двигуни крильчатої конструкції, в яких крутний момент створюється за рахунок аеродинамічних сил, що виникають на лопатях робочого вітроколеса. В більшості країн випускають і застосовують лише крильчаті вітродвигуни. Вони відрізняються великими коефіцієнтами використання енергії вітру і значно більшою швидкохідністю. Максимальне значення ξ для швидкохідних коліс досягає 0,45…0,48.

Електрична потужність, що розвивається вітроенергетичною установкою, може бути визначена з виразу, Вт:

$$P_{ВЕУ} = \pi \rho V^3 \frac{R^2}{2} \xi \eta, \quad (4)$$

де $P_{ВЕУ}$ – електрична потужність, що розвивається вітроенергетичною установкою, Вт;

η – ККД електромеханічного перетворення енергії (0,7–0,85) [15];

R – радіус лопаті вітроколеса, м.

Оскільки основним чинником, що визначає продуктивність ВЕУ, є швидкість вітру, виробники вітроенергетичного обладнання наводять у документації на вітроагрегат такі важливі показники, як мінімальна, номінальна і максимальна швидкості вітру [15, 19].

Для ВЕУ модельного ряду ENERCON залежність потужності (P) і коефіцієнта використання енергії вітру (ξ) від швидкості вітру (V) представлена в табл. 1 і на рис. 2 [20].

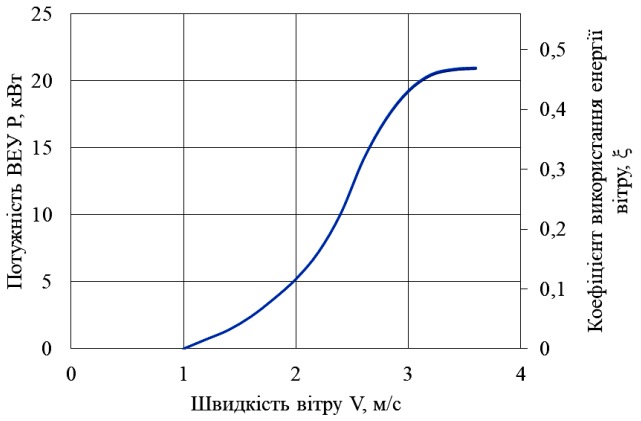


Рис. 2. Залежність вихідної потужності (P) і коефіцієнта використання енергії вітру (ξ) від швидкості вітру (V) дослідної ВЕУ

Fig. 2. The dependence of the output power (P) and the air-to-rotor ratio (ξ) from the wind speed (V) of the experimental wind turbine

© Ю. П. Гончаренко та ін. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69)847

Таблиця 1. Залежність потужності (P) ВЕУ і коефіцієнта використання енергії вітру (ξ) від швидкості вітру (V) для дослідної ВЕУ [20]

Швидкість вітру *V*, м/с	Потужність ВЕУ *P*, кВт	Коефіцієнт використання енергії вітру *ξ*,
1	0	0,000
1,2	0,7	0,016
1,4	1,4	0,031
1,6	2,4	0,054
1,8	3,7	0,083
2	5,2	0,117
2,2	7,2	0,162
2,4	10,1	0,227
2,6	14,1	0,317
2,8	17,1	0,385
3	19,2	0,432
3,2	20,4	0,459
3,4	20,8	0,468
3,6	20,9	0,470

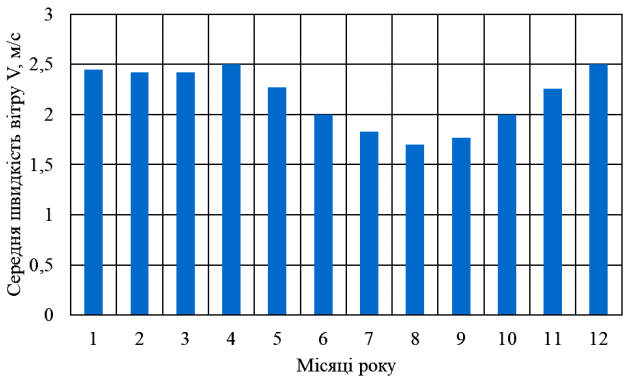


Рис. 3. Середня швидкість вітру по місяцях року

Fig. 3. Mean wind speed across the year by months

Із наведених графічних залежностей випливає, що для вибраних ВЕУ в Поліському регіоні залежність вихідної потужності (P) і коефіцієнта використання енергії вітру (ξ) від швидкості вітру (V) (рис. 2) матиме явно виражений нелінійний характер.

Розподіл вітрів за напрямками (рис. 5) показує наявність переважних напрямків вітру, характерних для Поліського регіону. Оскільки ефективність використання енергії вітрового потоку залежить від правильної орієнтації лопатей відносно напрямку вітру, з утворенням оптимального кута атаки, конструкція вітроелектричної установки має включати ефективну систему стеження за змінами напрямку вітру та переорієнтації установки в просторі. Виключення складають ВЕУ з вертикальною віссю обертання.

Розглянемо можливість використання ВЕУ та ефективність їх застосування для регіону Полісся. Для цього було опрацьовано статистичні дані номограми середньої швидкості вітру по місяцях року за період 2011–2021 рр. [21]. За результатами роботи на рис. 3, 4 та 5 відображено щомісячну частину вітрів, придатних для потреб вітроенергетики, та повторюваність напрямку вітру за румбами у %.

Як видно на рис. 3, річний розподіл швидкості вітру в Поліському регіоні є нерівномірним з суттєвим зниженням середньої швидкості вітру з червня по вересень. Водночас у цей період спостерігається сезонне зниження споживання електроенергії, що зменшує негативний вплив нерівномірності швидкості вітру впродовж року.

Зменшення середньої швидкості вітру є усередненим показником, який у свою чергу пов'язаний як зі зниженням зафіксованих швидкостей нижче ефективних значень, так і зі зменшенням тривалості вітрів, придатних до потреб вітроенергетики. Це явище відображене на рис. 4, з якого випливає потреба збільшувати акумуляторні потужності автономних вітроелектричних установок.

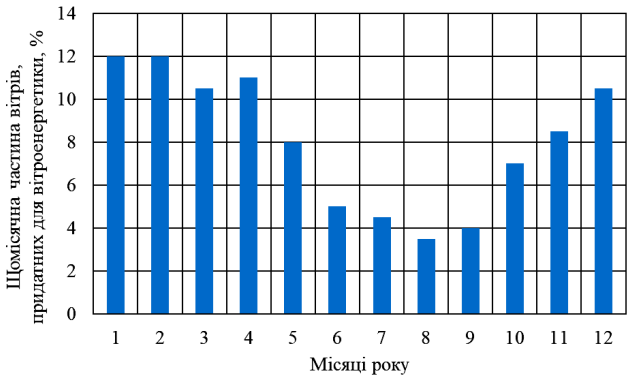


Рис. 4. Щомісячна частина вітрів, придатних для потреб вітроенергетики

Fig. 4. Winds suitable for energy production by months

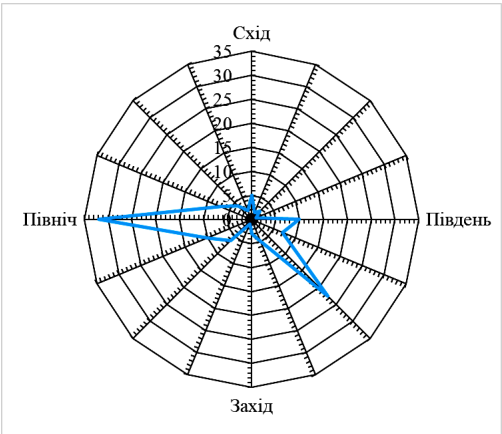


Рис. 5. Розподіл напрямку вітру за румбами в %

Fig. 5. Distribution of the wind`s directions in %

© Ю. П. Гончаренко та ін. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69)847

Слід відмітити, що ВЕУ є нестабільним джерелом електричної енергії, тому споживача цікавить не тільки розрахункова потужність, а й кількість виробленої нею електроенергії.

Для оцінки кількості виробленої енергії розглянемо варіанти роботи ВЕУ при незначних швидкостях вітру і керованому стані лопатей ВК, тобто для робочої характеристики ВЕУ Поліського регіону (див. рис. 4).

Середньорічна кількість часу $T_{сер}$ роботи ВЕУ в такому режимі визначається як, год/рік:

$$T_{сер} = 365 \cdot 24 \cdot [P(V_{max}) - P(V_{min})], \quad (5)$$

де $T_{сер}$ – середньорічна кількість часу роботи ВЕУ, год/рік;

V_{max} і V_{min} – швидкості вітру у відповідних точках робочої характеристики ВЕУ, м/с;

$P(V)$ – імовірнісна функція розподілу, яка використовується для опису розподілу швидкостей вітру за тривалий період часу.

Розподіл вітрових потоків найчастіше описується розподілом Релея, нормальним розподілом, розподілами Вейбулла, Максвелла тощо [18]. Визначення закону розподілу, який найточніше описує емпіричні дані, дає змогу якісніше провести моделювання вітрового навантаження й визначити параметри елементів вітроенергетичної установки [12].

На рис. 6 представлено: щільність імовірності швидкості вітру за нормальним розподілом; щільність імовірності швидкості вітру за розподілом Релея; середнє значення швидкості вітру; за емпіричною функцією розподілу (дані Гідрометцентру). Розрахунок здійснено на прикладі виробництва енергії вітроенергетичною установкою. Енергія, що виробляється вітротурбіною, прямопропорційна кубу швидкості вітру. Приймемо за 100 % енергію, яка отримана в результаті розрахунку за емпіричними даними. Подальші розрахунки свідчать, що обчислення за середнім значенням швидкості вітру дозволяють отримати 60 % значення, отриманого за емпіричними даними, згідно з нормальним законом розподілу вітрового потоку – 77,2 %, а згідно з законом Релея – 96 %.

Застосування розподілу Релея дає змогу підвищити точність обчислення на 18,8 і 36 % у порівнянні з нормальним розподілом і розрахунком за середнім значенням швидкості вітру відповідно.

Розподіл вітрових потоків, що підпорядковується розподілу Релея, виражає закон зміни P(V) відповідно до математичного виразу:

$$P(V) = 1 - \exp\left(-V_{сер}^2 / 2\sigma_V^2\right), \quad (6)$$

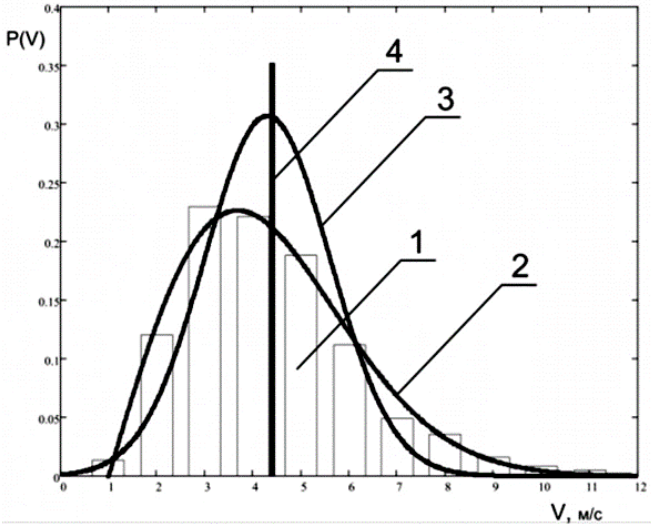


Рис. 6. Щільність розподілу ймовірності швидкості вітру в регіоні Полісся за: 1 – емпіричною функцією розподілу; 2 – розподілом Релея; 3 – нормальним розподілом; 4 – середньою швидкістю вітру

Fig. 6. Probability distribution density of the wind speed in Polissya region by: 1 – empirical distribution function; 2 – Rayleigh distribution; 3 – normal distributiom; 4 – mean wind speed

де $V_{сер}$ – середня швидкість вітру (рис. 6, графічна залежність 4);

σ_V^2 – середньоквадратичні відхилення величини швидкості вітру від його середньої швидкості.

Якщо в рівняння (6) підставити значення величин $V_{сер}$ та σ_V^2, тоді, відповідно до рис. 6, середньорічна кількість часу роботи ВЕУ в зазначеному режимі складатиме 1282 години.

Структурна схема підбору параметрів складових частин вітроенергетичної установки представлена на

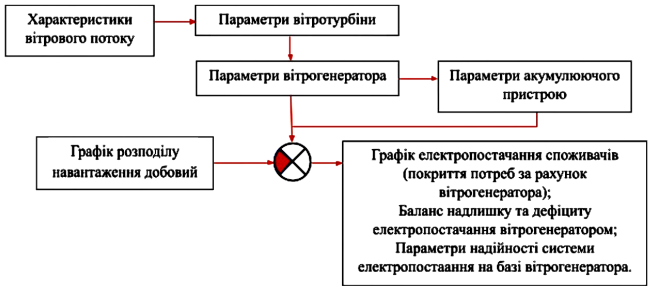


рис. 7.

Рис. 7. Структурна схема для підбору параметрів складових частин вітроенергетичної установки

Fig. 7. Structural diagram for selecting the parameters of the component parts of the wind power plant

Оскільки графік добового споживання електроенергії здебільшого не є рівномірним, а надходження

© Ю. П. Гончаренко та ін. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69)847

вітрової енергії, на думку авторів [1–7], носить імпульсний характер, то при визначенні характеристик елементів системи автономного електропостачання на основі вітроенергетичної установки доцільно використовувати математичне та комп'ютерне моделювання.

ВИСНОВКИ

1. Наведено аналітичні залежності для визначення раціональних параметрів складових частин системи автономного електропостачання на основі вітроенергетичної установки. Отримані розрахунки дозволяють забезпечити надійне та безперебійне електропостачання споживачів регіону Полісся.
2. Представлено графічні залежності (рис. 3–5) за якими відповідно до середньої швидкості вітру та встановленої частини вітрів, придатних для потреб вітроенергетики, визначено (залежно від місяця року) доцільність та ефективність використання автономних ВЕУ малої потужності для регіону Полісся.
3. Виконано моделювання вітрового навантаження регіону Полісся за емпіричними даними, розподілом Релея, нормальним законом та середньою швидкістю вітру. Встановлено, що застосування розподілу Релея дозволяє підвищити точність обчислення на 18,8 і 36 % у порівнянні з нормальним розподілом і розрахунком за середнім значенням швидкості вітру відповідно.

ПОСИЛАННЯ

1. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines,* Trevor M. Letcher Ed. Academic Press, 2017.
2. *Small Wind: Planning and Building Successful Installations*. Nolan Clark Ed. Academic Press, 2013.
3. E. Zhao, S. Sun, S. Wang. *New developments in wind energy forecasting with artificial intelligence and big data: A scientometric insight*. Data Science and Management, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dsm.2022.05.002
4. M. R. Islam, S. Mekhilef, R. Saidur. “Progress and recent trends of wind energy technology”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 456–468, 2013. DOI:10.1016/j.rser.2013.01.007
5. E. J. Brunner, D. J. Schwegman. “Commercial wind energy installations and local economic development: Evidence from U.S. counties”. *Energy Policy*, vol. 165, 112993, 2022. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.112993
6. S. Sinha, S. S. Chandel. “Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 755–769, 2015. DOI:10.1016/j.rser.2015.05.040
7. Ch. Mohammed, Z. Hassan, El. Mohammed, Z. Smail. “Electric System Cascade Extended Analysis for optimal sizing of an autonomous hybrid CSP/PV/wind system with Battery Energy Storage System and thermal energy storage”. *Energy*, vol. 227, 120444, 2021. DOI:10.1016/j.energy.2021.120444
8. В. Ф. Белей, А. Ю. Никишин. “Современная ветроэнергетика: тенденции развития, проблемы и некоторые пути их решения”, *Электрика*, № 8, с. 19–22, 2006.
9. Б. Г. Тучинський, В. А. Точений, І. В. Іванченко. “Аналітичний огляд тенденцій технічних параметрів вітрових електричних установок”, *Відновлювана енергетика*, № 3, с. 14–17, 2009.
10. В. С. Зарубин. *Математическое моделирование в технике* : Учеб. для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. 2-е изд. Москва, Россия: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.
11. M. De. Liu, L. Ding, & Y. L. Bai. Application of hybrid model based on empirical mode decomposition, novel recurrent neural networks and the ARIMA to wind speed prediction. *Energy Conversion and Management*, vol. 233, 113917, 2021. DOI:10.1016/j.enconman.2021.113917
12. H. Liu, & C. Chen. Data processing strategies in wind energy forecasting models and applications: A comprehensive review. *Applied Energy*, vol. 249, pp. 392–408, 2019. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.04.188
13. J. S. Rohatgi, V. Nelson. “Wind Characteristics: An Analysis for Generation of Wind Power”. *Alternative Energy Institute*. West Texas A&M University, Canyon, TX. 1994.
14. I. Pakere, M. Kacare, A. Grāvelsiņš, R. Freimanis, A. Blumberga. “Spatial analyses of smart energy system implementation through system dynamics and GIS modelling. Wind power case study in Latvia”. *Smart Energy*, vol. 7, 100081, 2022. DOI: 10.1016/j.segy.2022.100081
15. Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. *Основи вітроенергетики* : підручник. Дніпропетровськ, Нац. гірн. ун-т, 2015.
16. В. Л. Мисайлов, Ю. Н. Ульянов. “Возможности повышения коэффициента использования энергии ветра в ветроэнергетических установках с горизонтальной осью вращения ветроколеса”,

© Ю. П. Гончаренко та ін. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69)847

Вісник НТУ «ХПІ», № 58 (1031), с. 136–149, 2013.

17. *Відновлювані джерела енергії*, С. О. Кудря, ред. Київ, Україна: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020.
18. *Математична статистика: збірник задач* : навч. посіб.; уклад.: І. Ю. Каніовська, О. В. Стусь. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.
19. Біла Книга 2021 Офшорна вітроенергетика та "зелений" водень: відкриття нових меж енергетичної потужності України. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/2_5438583199909284286.pdf
20. ENERCON. Energy for the world. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.enercon.de/en/products/
21. *Статистичний щорічник Житомирської області за 2021 рік*, Г. Пашинська, ред. Жит омир, Україна: Головне управління статистики у Житомирській області, 2021.

REFERENCES

1. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines,* Trevor M. Letcher Ed. Academic Press, 2017.
2. *Small Wind: Planning and Building Successful Installations*. Nolan Clark Ed. Academic Press, 2013.
3. E. Zhao, S. Sun, S. Wang. *New developments in wind energy forecasting with artificial intelligence and big data: A scientometric insight*. Data Science and Management, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dsm.2022.05.002
4. M. R. Islam, S. Mekhilef, R. Saidur. "Progress and recent trends of wind energy technology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 456–468, 2013. DOI:10.1016/j.rser.2013.01.007
5. E. J. Brunner, D. J. Schwegman. "Commercial wind energy installations and local economic development: Evidence from U.S. counties". *Energy Policy*, vol. 165, 112993, 2022. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.112993
6. S. Sinha, S. S. Chandel. "Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 755–769, 2015. DOI:10.1016/j.rser.2015.05.040
7. Ch. Mohammed, Z. Hassan, El. Mohammed, Z. Smail. "Electric System Cascade Extended Analysis for optimal sizing of an autonomous hybrid CSP/PV/wind system with Battery Energy Storage System and thermal energy storage". *Energy*, vol. 227, 120444, 2021. DOI:10.1016/j.energy.2021.120444
8. V. F. Beley, A. Yu. Nikishin. "Modern Wind Energy: Development Trends, Problems and Some Ways to Solve Them" (in Russian), *Elektrika*, No. 8, pp. 19–22, 2006.
9. B. G. Tuchinsky, V. A. Tocheny, I. V. Ivanchenko. "Analytical review of trends in technical parameters of wind power plants", *Renewable Energy*, № 3, p. 14–17, 2009.
10. B. C. Zarubin. *Mathematical modeling in technology: Textbook for universities,* (in Russian). B. C. Zarubina, A. P. Krishchenko Ed. 2nd ed. Moscow, Russia: Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman, 2003.
11. M. De. Liu, L. Ding, & Y. L. Bai. Application of hybrid model based on empirical mode decomposition, novel recurrent neural networks and the ARIMA to wind speed prediction. *Energy Conversion and Management*, vol. 233, 113917, 2021. DOI:10.1016/j.enconman.2021.113917
12. H. Liu, & C. Chen. Data processing strategies in wind energy forecasting models and applications: A comprehensive review. *Applied Energy*, vol. 249, pp. 392–408, 2019. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.04.188
13. J. S. Rohatgi, V. Nelson. "Wind Characteristics: An Analysis for Generation of Wind Power". *Alternative Energy Institute*. West Texas A&M University, Canyon, TX. 1994.
14. I. Pakere, M. Kacare, A. Grāvelsiņš, R. Freimanis, A. Blumberga. "Spatial analyses of smart energy system implementation through system dynamics and GIS modelling. Wind power case study in Latvia". *Smart Energy*, vol. 7, 100081, 2022. DOI: 10.1016/j.segy.2022.100081
15. G. Pivnyak, F. Shkrabets, N. Neuberger, D. Tsyplenkov. *Fundamentals of wind energy: Textbook*, (in Ukrainian). Dnipropetrovsk, Ukraine: National Mining University, 2015.
16. V. L. Misaylov, Yu. N. Ulyanov. "Possibilities of increasing the coefficient of use of wind energy in wind turbines with a horizontal axis of rotation of the wind wheel" (in Ukrainian), *Bulletin of NTU "KhPI",* No. 58 (1031), pp. 136–149, 2013.
17. *Renewable energy sources*, (in Ukrainian), S. Kudria, Ed. Kyiv, Ukraine: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU, 2020.
18. *Mathematical statistics: a collection of problems*: textbook; I. Yu. Kaniovska, O. V. Stus Ed. Kyiv, Ukraine: KPI im. Igor Sikorsky, 2019.
19. *White Book 2021 Offshore wind energy and "green"*

© Ю. П. Гончаренко та ін. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69)847

hydrogen: opening new frontiers of Ukraine's energy capacity, (in Ukrainian). [Online]. Available: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/2_5438583199909284286.pdf

20. ENERCON. Energy for the world. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.enercon.de/en/products/

21. *Statistical Yearbook of Zhytomyr region for 2021*, G. Pashinskaya Ed. Zhytomyr, Ukraine: Main Department of Statistics in Zhytomyr Region, 2021.

© Ю. П. Гончаренко та ін. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.2(69)847