

ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОВОГО РЕЖИМУ ПІВДНЯ УКРАЇНИ ДЛЯ ПОТРЕБ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ

М. П. КУЗНЄЦОВ, доктор технічних наук, професор
Інститут відновлювальної енергетики

E-mail: nik_ku@ukr.net, ORCID iD: 0000-0002-0497-7439

О. В. ЛИСЕНКО, кандидат технічних наук, доцент
Таврійський державний агротехнологічний університет

E-mail: Helga_vl@ukr.net, ORCID iD: 0000-0001-7085-7796

Анотація. *Сучасний стан енергетики потребує альтернативних шляхів забезпечення регіонів України енергоресурсами. Проведення аналізу та оцінки характеристик вітрового режиму є одним з найважливіших етапів у визначенні перспективності території регіону для розвитку вітроенергетики. Однак суттєвого та глибокого аналізу регіональних особливостей не проводилось, в першу чергу, за відсутності достатніх даних для проведення таких досліджень. У статті проведено оцінку характеристик вітрового потоку на півдні України за дворічним масивом 10-хвилинних вимірів швидкості та напрямку вітру метеопостом Ботіївської ВЕС, Приазовського району, Запорізької області. А саме, проведено розрахунок середньомісячної швидкості вітру та її середньоквадратичного відхилення, для оцінки продуктивності ВЕС визначено потенційну питому потужність типової вітроенергетичної установки.*

Проведено порівняльну оцінку розрахунків за розподілом Вейбула та фактичними значеннями швидкості вітру на різних висотах. Проаналізована залежність швидкості вітру від висоти виміру та можливі флуктуації швидкості й напрямку вітру. Проведена оцінка кореляції між значеннями швидкості вітру та його напрямком.

Ключові слова: *вітровий потік, середня швидкість вітру, енергетична характеристика ВЕС*

Актуальність. Україна має один із найбільших рівнів споживання енергоресурсів: 2,2 % від світового споживання енергії за менше ніж 1% населення світу. Одна з причин інтенсивного енергоспоживання є застарілі технології й обладнання, які вже давно виробили свій ресурс і мають дуже низьку енергетичну ефективність. І хоча заміна старого обладнання та використання інноваційних технологій дає змогу зменшити енергоспоживання на 30%, такі заходи дорогі й тривалі в часі. Природні ресурси (такі як вугілля, нафта, газ) і засновані на їх використанні електрогенеруючі станції на сьогодні є ключовими джерелами енергії. Їхня частка в загальному балансі первинної енергії України сягає 79 %; атомні електростанції в загальному балансі виробляють близько 18 % первинної

енергії. Частка відновлювальних джерел енергії (таких як енергія сонця, вітру, води, біогаз тощо) в загальному балансі незначна і складає лише 3 % первинної енергії, незважаючи на те, що Україна має величезний потенціал. Україна забезпечує себе первинними ресурсами лише на 61 %, а 39 % складає дефіцит, який забезпечується імпортуванням енергоресурсів з інших країн. Час від часу залежність від імпортованих енергоресурсів призводить до серйозних економічних і політичних конфліктів, які суттєво впливають на національну безпеку України, гальмує зростання економіки. Саме тому існує велика необхідність пошуку альтернативних шляхів скорочення цієї залежності, особливо у світлі вичерпності природних ресурсів, можливих катастроф, виконання міжнародних зобов'язань щодо зменшення викидів парникових газів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведення аналізу та оцінки характеристик вітрового режиму є одним з найважливіших етапів у визначенні перспективності території для розвитку вітроенергетики. Аналізу спостережень метеорологічних показників та оцінці вітрового режиму території України присвячено ряд робіт вітчизняних фахівців. Але вивчення особливостей вітрового режиму окремих регіонів України майже не проводилося. Аналіз енергетичної складової вітрового режиму території України представлений в працях С.О. Кудрі, М.П. Кузнецова, Л.В. Дмитренка і С.Л. Барандіча. У працях оцінено енергетичний потенціал вітру на різних висотах, вченими проведено районування території України за показниками енергоресурсів та розроблено карти вітрового потенціалу території України. Однак суттєвого та глибокого аналізу регіональних особливостей не проводилось, в першу чергу, за відсутності необхідних даних для проведення таких досліджень. Адже ті дані, якими оперує метеорологічна служба, не відповідають потребам енергетики.

Мета дослідження – аналіз та оцінка характеристик вітрового потоку півдня України для потреб вітроенергетики на прикладі метеоданих, отриманих з Ботіївської ВЕС у Приазовському районі Запорізької області.

Матеріали і методи дослідження. Для проведення досліджень вітрового режиму використано дворічний масив результатів 10-хвилинних вимірів швидкості та напрямку вітру, отриманих зі спільної метеовежі, синхронно на двох висотах – 66 та 94 м. Для аналізу обрано чотири місяці: січень, квітень, липень, жовтень – як репрезентативні для різних сезонів року.

Крім оцінки стохастичності параметрів власне вітру для вітроенергетики важливим є енергетичний потенціал вітрових потоків. Традиційним для оцінки енергетичного потенціалу вітру є використання кубічної залежності потужності від швидкості вітру. Однак, оскільки реальні енергетичні характеристики сучасних вітроелектричних установок (ВЕУ) мають суттєво нелінійну характеристику, яка лише частково має параболічний характер, в даному дослідженні використано типову криву потужності ВЕУ умовно одиничної потужності. На рис. 1 зображено таку

енергетичну характеристику та апроксимацію її табличних значень, що відповідають популярним сучасним моделям вітроустановок мегаватного класу. Загальна форма виразу для кривої потужності має вигляд:

$$P_W(v) = \begin{cases} 0, & v < V_0, v \geq V_m \\ P(v, a_1, a_2, \dots), & V_0 \leq v \leq V_p \\ P_W, & V_p < v < V_m \end{cases} \quad (1)$$

де V_0 , V_p та V_m – відповідно стартова, розрахункова (що відповідає номінальній потужності P_H) та максимальна швидкості вітру,

a_i – параметри, що описують вигляд кривої потужності на ділянці без обмежень. Наприклад, це можуть бути коефіцієнти логістичної кривої для конкретного типу ВЕУ:

$$P(v) = \frac{P_H}{1 + a_1 e^{a_2 v}} \quad (2)$$

Для визначення питомих показників прийнято: $P_H=1$ (одиниць потужності).

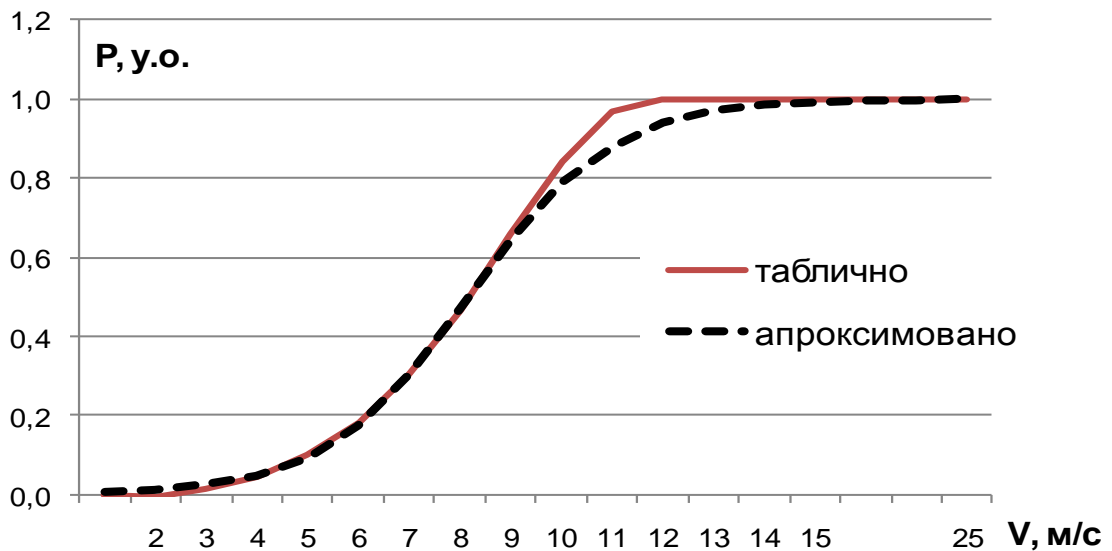


Рис.1. Типова крива потужності ВЕУ (при $P_H=1$ у.о.)

Вироблена ВЕУ за певний час T електроенергія визначається за виразом:

$$E_W = T \int_0^{\infty} P_W(v) f(v) dv \quad (\text{кВт. год}), \quad (3)$$

де $f(v)$ – функція щільності розподілу швидкості вітру як випадкової величини;

v – поточна швидкість вітру.

Інтеграл за виразом (3) визначає середню на часовому інтервалі T потужність ВЕУ. Для опису функції щільності розподілу швидкості вітру звичайно використовують двопараметричний розподіл Вейбула:

$$f(v) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\gamma\right], \quad (4)$$

де β і γ – параметри масштабу і форми відповідно.

Разом з тим, даний розподіл не завжди точно відповідає фактичному, тому важливо пересвідчитись у розмірі отриманої похибки для оцінки її допустимості. За необхідності можна застосувати інші розподіли чи їх комбінації, щодо яких існують численні дослідження.

В таблиці 1 наведено значення середньомісячної швидкості вітру V_c , її середньоквадратичного відхилення σ (висота вимірів 94 м) та відповідні параметри розподілу Вейбула β і γ з виразу (4). Для оцінки потенційної продуктивності ВЕУ з відповідною висотою осі ротора розраховано середню потужність P_c за розподілом Вейбула (3) та за фактичних значень швидкості вітру на 10-хвилинних інтервалах з перерахунком у потужність за виразом (2).

1. Параметри вітрового потоку на висоті 94 м (2016 рік)

місяць	V_c , м/с	σ , м/с	γ	β , м/с	P_c (Вейб.)	P_c факт.
січень	7,43	3,46	1,94	8,40	0,39	0,41
квітень	7,98	3,59	2,34	9,00	0,43	0,44
липень	6,23	2,62	2,51	7,01	0,27	0,28
жовтень	9,32	4,14	2,37	10,52	0,53	0,58

В таблиці 2 наведено аналогічні значення для висоти вимірів 66 м.

2. Параметри вітрового потоку на висоті 66 м (2016 рік)

місяць	V_c , м/с	σ , м/с	γ	β , м/с	P_c (Вейб.)	P_c факт.
січень	6,82	2,97	2,42	7,70	0,33	0,34
квітень	7,46	3,31	2,38	8,42	0,39	0,39
липень	5,95	2,38	2,65	6,69	0,24	0,24
жовтень	8,48	3,81	2,35	9,57	0,47	0,48

Що стосується середньої швидкості вітру, на меншій висоті вона традиційно менша. Зазначимо, що для перерахунку швидкості вітру на різні висоти традиційно застосовують формулу Хелмана: $V(h_1) = V(h_2) \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^\alpha$, де

$0,14 \leq \alpha \leq 0,24$ в залежності від шорсткості підстилаючої поверхні. В нашому випадку показник експоненційної залежності $\alpha=0,21$ для середньорічних значень швидкості вітру на висотах 66 та 94 м; якщо ж розраховувати цей показник (експоненту Хелмана) для кожного виміру, то осереднене значення становило б $\alpha=0,18$. Ця залежність є статистичною, а не функціональною. Так на рис. 2 зображено приклад запису швидкості вітру на двох висотах (дані від 5 жовтня 2016р.), де ці швидкості в окремих випадках можуть бути

практично рівними. При цьому кореляційна залежність поточних значень досить висока – на рівні 0,95-0,97 для досліджених даних.

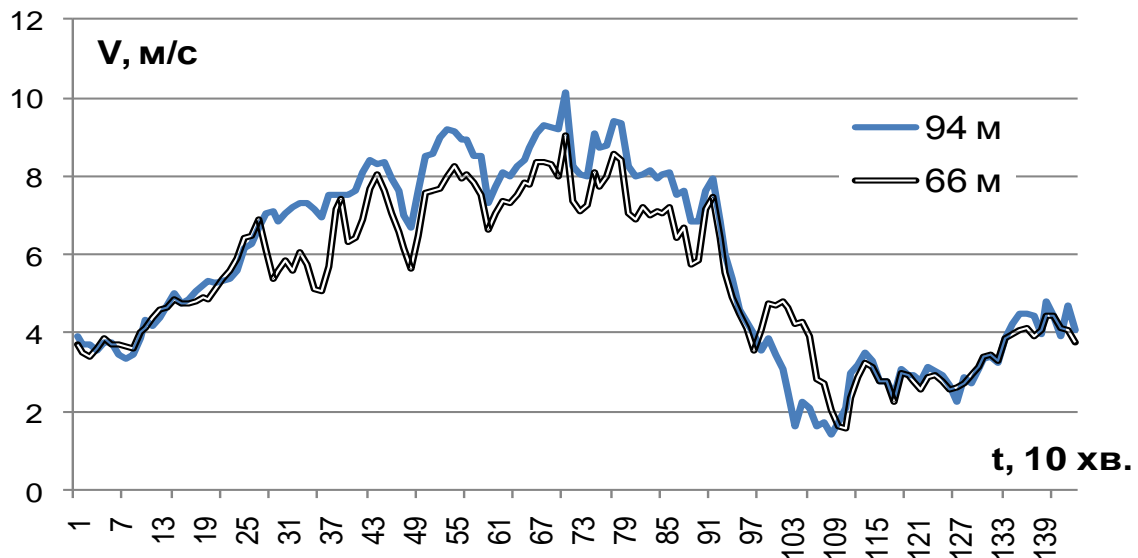


Рис. 2. Добовий графік швидкості вітру на різних висотах

Можливі навіть ситуації інверсійних значень (на висоті 66 м швидкість вітру вища, ніж на 94 м); такою особливістю є діапазон між 97-м та 109-м 10-хвилинними інтервалами, тобто з 16:20 до 18:00. В цей час напрям вітру короткочасно змінився з північно-західного на північно-східний; можливо, саме турбулентність за напрямом (рис. 3) спричинила такий ефект.

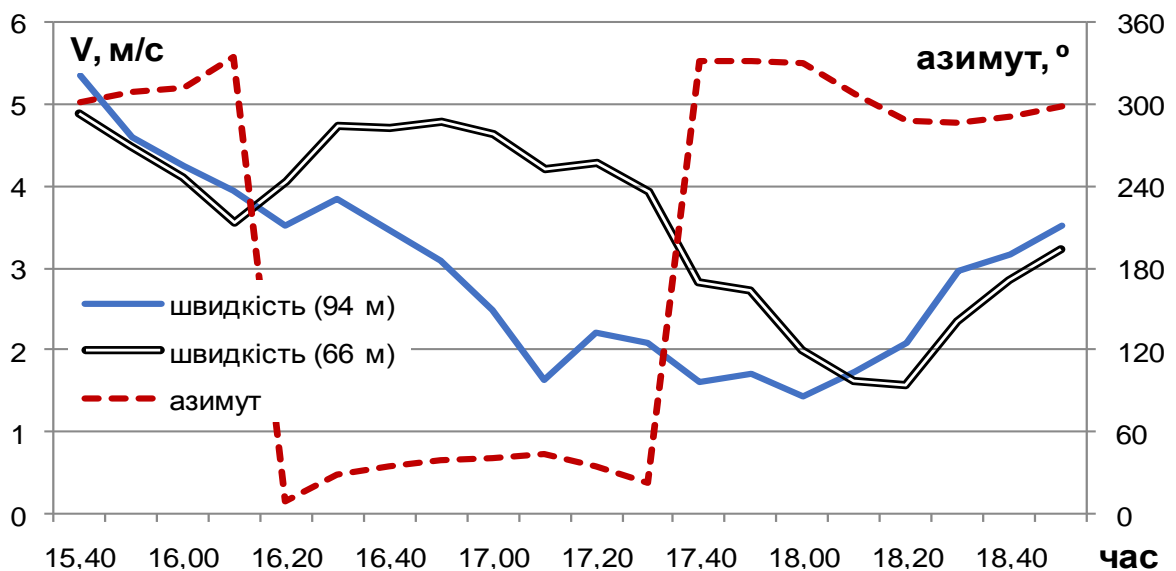


Рис. 3. Флуктуації швидкості та напрямку вітру

Щоб оцінити кореляцію між значеннями швидкості та напрямку вітру, розрахуємо кореляційний коефіцієнт за виразом [2]:

$$r^2 = \frac{(r_{vc} - r_{vs})^2}{1 - r_{cs}^2}, \quad (5)$$

де $r_{vc} = \text{corr}(v, \cos \theta)$; $r_{vs} = \text{corr}(v, \sin \theta)$; $r_{cs} = \text{corr}(\cos \theta, \sin \theta)$; θ – напрям вітру (азимут).

Для даних 2016 р. маємо:
 $r_{vc} = 0,06$; $r_{vs} = 0,13$; $r_{cs} = -0,01$; $r = 0,07$, в тому числі за місяцями:

січень – $r_{vc} = -0,21$; $r_{vs} = -0,08$; $r_{cs} = -0,04$; $r = 0,13$;

квітень – $r_{vc} = 0,21$; $r_{vs} = -0,04$; $r_{cs} = -0,14$; $r = 0,25$;

липень – $r_{vc} = 0,14$; $r_{vs} = -0,03$; $r_{cs} = -0,11$; $r = 0,17$;

жовтень – $r_{vc} = 0,10$; $r_{vs} = 0,40$; $r_{cs} = 0,14$; $r = 0,30$.

Такі значення кореляції слід вважати слабо значимими.

Результати досліджень та їх обговорення. Як впливає з отриманих даних (табл. 1, 2), розрахункова потужність умовної ВЕУ за розподілом Вейбула дещо менша від отриманої з фактичних значень швидкості вітру, при цьому на висоті 94 м середня похибка приблизно дорівнює 4%, а на висоті 66 м – 2%. Помітно також, що параметр форми на меншій висоті дещо більший, що свідчить про меншу дисперсію і викликано стабільнішим вітром, проте, ця різниця незначна і може вважатися статистично незначимою. Отже, залежність розподілу швидкості вітру від висоти, принаймні на висотах 60-100 м, можна вважати стаціонарною в сенсі імовірності. Тому, для ландшафтів, подібних до площадки розглядуваної ВЕС, за оцінки потенційної продуктивності вітроустановок можна користатися параметрами вертикального розподілу швидкості вітру та щільності часового розподілу відповідно до формул Хелмана і Вейбула. Імовірна похибка при цьому співмірна з похибкою вимірювань і на передпроектній стадії може вважатися нехтовною.

Відповідно до результатів кореляційного аналізу, залежність швидкості вітру від напрямку в межах року статистично незначна, хоча в окремі місяці досягає рівня слабкої залежності. Отже, за визначення дислокації ВЕУ на площадці ВЕС достатньо користуватися наявною в метеорологічних довідниках діаграмою азимутального розподілу (розою вітрів).

Досліджені параметри придатні для оцінки продуктивності ВЕС на тривалому часовому горизонті. Це необхідно для визначення придатності територій та доцільності застосування там вітрової енергетики. Однак для оцінки взаємодії ВЕС з локальною електромережею важливо знати також поведінку поточної потужності, тобто характер короткочасних змін швидкості вітру, тривалості окремих режимів тощо. Це вимагає подальших досліджень на відповідність вимогам роботи енергосистеми в досліджуваному регіоні.

Висновки і перспективи. Досліджені показники вітрового режиму дозволяють точніше спрогнозувати на тривалий час роботу вітроелектричної станції в досліджуваному регіоні та її вплив на характер постачання електроенергії у разі роботи у складі централізованої чи локальної енергосистеми. При цьому перелік досліджених параметрів не

є вичерпним, а потреба в додаткових дослідженнях визначається особливостями роботи енергосистеми як в частині генерування, так і споживання електроенергії.

Список використаних джерел

1. Практичний посібник із впровадження компоненту з енергоефективності проекту МРГ-II «Енергоефективні технології та відновлювальні джерела енергії» червень 2012 [Електроний ресурс] // Режим доступу: http://cba.org.ua/images/stories/documents/EE_Manual_UKR.pdf

2. A joint probability density function of wind speed and direction for wind energy analysis / J. A. Carta, P. Ramirez, C. Bueno. // Energy Conversion and Management – 2008. – V.49. – P.1309–1320.

References

1. Practical Guide of Component Implementation of Energy Efficiency Project CBA - II "Energy efficient technologies and renewable sources of energy", June 2012. Available at: http://cba.org.ua/images/stories/documents/EE_Manual_UKR.pdf

2. 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

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ЮГА УКРАИНЫ ДЛЯ НУЖД ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

Н. П. Кузнецов, О. В. Лисенко

Аннотация. Современное состояние энергетики свидетельствует о необходимости поиска альтернативных путей обеспечения энергоресурсами территории Украины. Проведение анализа и оценки характеристик ветрового режима является одним из важнейших этапов в определении перспективности территории для развития ветроэнергетики. Однако существенного и глубокого анализа региональных особенностей не проводилось, в первую очередь, из-за отсутствия необходимых данных. В статье проведена оценка характеристик ветрового потока юга Украины по двухлетнему массиву 10-минутных измерений скорости и направления ветра метеопостом Ботиевской ВЭС, Приазовского района, Запорожской области. В частности, проведен расчет среднемесячной скорости ветра и его среднеквадратичного отклонения, для оценки производительности ВЭС определена потенциальная удельная мощность типовой ветроэнергетической установки. Проведена сравнительная оценка расчетов по распределению Вейбула и фактическими значениями скорости ветра на разных высотах. Проанализирована зависимость скорости ветра от высоты измерения и возможные флуктуации скорости и направления ветра. Проведена оценка корреляции между значениями скорости ветра и его направлением.

Ключевые слова: ветровой поток, средняя скорость ветра, энергетическая характеристика ВЭУ

WIND REGIME CHARACTERISTICS ESTIMATION OF SOUTH OF UKRAINE FOR THE WIND ENERGY NEEDS

M. Kuznietsov, O. Lysenko

Abstract. *The current state of energy shows that there is great need to search for alternative ways of energy supply in Ukraine. Analysis and evaluation of the characteristics of the wind regime is one of the most important stages in the identification of promising areas for wind energy development. However, substantial and in-depth analysis of regional features hasn't been conducted, primarily due to lack of data needed to conduct such studies. In the article the characteristics of the wind flow south of Ukraine for a two-year array of 10-minute measuring wind speed and direction according to WPP Botiivskoi, Priazovskiy, Zaporizhzhya region was evaluated. In particular, the average monthly wind speed and its standard deviation was calculated, and to evaluate the performance of the wind turbine the potential power of a typical wind power unit was identified. The comparative evaluation of the calculations of the distribution of Weibull and actual values of the wind speed at the different heights was estimated. The dependence of the wind speed from altimetry and possible fluctuations in wind speed and direction was analyzed. The evaluation of the correlation between wind speed and direction was shown.*

Keyword:. *the wind regime, the average wind speed, wind turbine power output*

УДК 621.311.26.031

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПІД ЧАС ГЕНЕРЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ІЗ БІОГАЗУ

Н. В. БУРЕГА, молодший науковий співробітник
**Тернопільський національний педагогічний
університет ім. В. Гнатюка**
E-mail: buregan@ukr.net

Анотація. *Розглянута перспектива використання органічної біосировини, що дозволить зміцнити власну енергосистему та вирішити назріваючу екологічну катастрофу через низький рівень використання технологій утилізації відходів та вловлення сміттєзвального біогазу. Проведено аналіз тенденцій росту ринку біогазових технологій на основі світових лідерів його виробництва. З метою більш детального порівняння обрано п'ять комерційних електротехнологічних комплексів для визначення їх енергетичних та*

© Н. В. Бурега, 2017