

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ**

УДК 620.92

**ОЦІНКА ГРАДІЄНТІВ ГЕНЕРУЮЧОЇ ПОТУЖНОСТІ  
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК****Кузнєцов М.П.**<sup>\*</sup>, д.т.н.**Лисенко О.В.**<sup>\*\*</sup>, к.т.н.<sup>\*</sup>*Інститут відновлювальної енергетики*<sup>\*\*</sup>*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел. 0619 421174

**Анотація** – проведено оцінку поточної мінливості потужності 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 та аналіз темпів зміни швидкості вітру та як наслідок генеруючої потужності, що є важливими показниками стабільної роботи електричної мережі.

**Ключові слова:** вітроенергетична установка, вітроенергетичний потенціал, генеруючі потужність.

*Постановка проблеми.* На теперішній час у світі актуальним завданням енергетики є пошуки оптимальних варіантів енергозабезпечення та енергонезалежності за рахунок зменшення споживання імпортованих енергоресурсів, у першу чергу для України – природного газу.

За показником енергоємності ВВП України в декілька разів перевищує показники розвинених країн Західної і Східної Європи. Енергоємність ВВП України (дані на 2014 рік) становила 0,348 кг умовного палива на долар виробленої продукції. Таким чином, питомі енерговитрати України (на \$1 ВВП), в середньому, перевищують рівень Великобританії в 4,8 рази, Туреччини в 3,8 рази, Польщі в 3 рази, Білорусії в 1,8 разів. [1]

Це свідчить про гостру необхідність для України підвищення рівня енергоефективності, впровадження альтернативних енергозощаджуючих технологій для зміцнення національної енергетичної безпеки, і має бути однією з пріоритетних цілей державної політики.

*Аналіз останніх досліджень.* Протягом останніх років в Україні діяли 12 державних вітряних електростанцій із сумарною встановле-



ною потужністю 94 МВт, що становить лише 0,2% від загального обсягу генеруючих потужностей в Україні. [2].

Аналізу спостережень метеорологічних показників та оцінці вітрового режиму території України присвячено ряд робіт вітчизняних фахівців. Але вивчення особливостей вітрового режиму та, як наслідок, енергетичних показників вітрового потоку окремих регіонів України майже не проводилося.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Оцінка градієнтів поточної генеруючої потужності вітроенергетичних установок за характеристиками вітрового потоку на прикладі метеоданих, отриманих з Ботіївської ВЕС у Приазовському районі Запорізької області.

**Основні матеріали дослідження (основна частина).** Важливою характеристикою вітрового режиму є його поривчастість, в даному випадку темп зміни швидкості вітру за короткий часовий проміжок. Для стабільної роботи електричної мережі показовим є темп зміни генеруючої потужності. Наявні метеодані дають можливість оцінити зміну потужності ВЕУ (в умовних одиницях, або в долях номінальної потужності) за 10 хвилин, яку можна розглядати як випадковий елементарний стрибок потужності. Використовуючи нелінійну залежність (1), масив даних щодо швидкості вітру трансформуємо в масив значень потужності ВЕУ.

$$P_1(v) = \begin{cases} 0, & v < V_0, v \geq V_m \\ P(v, a_1, a_2, \dots), & V_0 \leq v \leq V_p \\ P_w, & V_p < v < V_m \end{cases} \quad (1)$$

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.

Розрахуємо характер розподілу елементарних стрибків потужності як випадкової величини.

В табл. 1-3 наведено дані попереднього аналізу для характерних місяців 2016 р. (зима, весна, літо, осінь), що стосуються вимірів на висоті 94 м. Як показав аналіз даних, математичне очікування стрибків близьке до нуля, а їх розподіл має ознаки симетрії. Припускаючи нормальність розподілу величини стрибків, знаходимо максимальну амплітуду стрибків з імовірністю 0,99 (квантиль нормального розподілу 2,58) та з імовірністю 0,95 (квантиль 1,96).

Як бачимо, значні стрибки (більше половини номінальної потужності) мають характер окремих викидів, і вже при відсіюванні 1% екс-



тремальних значень (симетрично по 0,5% додатних та від'ємних) розмах стрибків становить близько 0,17 номінальної потужності ВЕУ, а при відкиданні 5% – 0,13 номінальної потужності. Імовірність 0,95 тут розглядається як прийнятний показник, що зокрема застосовується до технічної надійності ВЕУ чи до забезпечення частоти в електромережі. Імовірність 0,99 демонструє вплив імовірних збоїв при вимірюванні, які мають нетиповий для даного процесу характер.

Таблиця 1 - Показники розподілу стрибків потужності ВЕУ (у долях від номінальної потужності)

місяць	$\Delta P_{\max}$	$\Delta P_{\min}$	$\sigma$	$2,58 \cdot \sigma$	$1,96 \cdot \sigma$
січень	0,39	-0,45	0,059	0,15	0,12
квітень	0,47	-0,45	0,068	0,17	0,13
липень	0,37	-0,55	0,063	0,16	0,12
жовтень	0,46	-0,56	0,052	0,13	0,10

Перевіримо, наскільки показники нормального розподілу відповідають фактичним для наявного масиву даних. В табл. 2 наведено гістограми розподілу величини стрибків по градаціях потужності.

Таблиця 2 - Гістограми стрибків потужності

діапазон	Частота			
	січень	квітень	липень	жовтень
> -0,6	0	1	0	1
-0,6...-0,5	0	1	1	2
-0,5...-0,4	1	2	1	0
-0,4...-0,3	3	8	3	3
-0,3...-0,2	20	34	29	13
-0,2...-0,1	182	170	194	115
-0,1...0,0	2142	2026	2022	2171
0,0...0,1	1937	1828	1988	2028
0,1...0,2	152	204	179	108
0,2...0,3	18	33	39	18
0,3...0,4	8	6	7	2
0,4...0,5	0	5	0	2
0,5...0,6	0	1	0	0

Для порівняння з показниками нормального розподілу визначимо екстремальні значення стрибків потужності, відкидаючи (симетрично) кількість вимірів, що відповідає ймовірностям 0,99 та 0,95 (табл. 3).

Результати підрахунку фактичних даних вказують на дещо вищі показники елементарних стрибків потужності, ніж розраховані за квантилями нормального розподілу. Тут фактичний розподіл відповідає нормальному за параметром симетрії, проте не відповідає за параметром ексцесу. Коригування величини середньоквадратичного відхилення дозволяє досить точно моделювати фактичний розподіл нормальним – в даному випадку достатньо вважати  $\sigma$  меншим на 20% порівняно з фактичним значенням. Графічне порівняння фактичного, нормального та коригованого розподілів наведено на рис. 1.

Таблиця 3 - Граничні показники стрибків потужності ВЕУ

місяць	max 0,99	min 0,99	max 0,95	min 0,95
січень	0,22	-0,21	0,15	-0,15
квітень	0,27	-0,26	0,17	-0,16
липень	0,26	-0,24	0,17	-0,16
жовтень	0,20	-0,20	0,14	-0,13

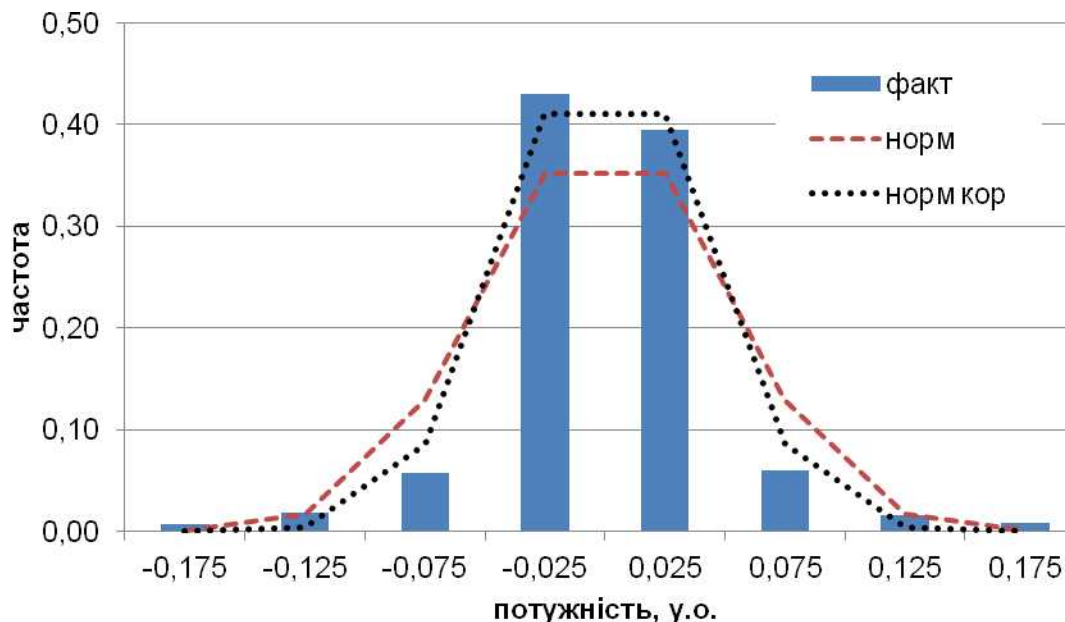


Рис. 1. Гістограма стрибків потужності ВЕУ (фактична та нормальна)

Для порівняння наведемо аналогічні результати для вимірів, зроблених на висоті 66 м (табл. 4 та 5).



Таблиця 4 - Показники розподілу стрибків потужності ВЕУ (66 м)

місяць	$\Delta P_{\max}$	$\Delta P_{\min}$	$\sigma$	$2,58 \cdot \sigma$	$1,96 \cdot \sigma$	max 0,99	min 0,99	max 0,95	min 0,95
січень	0,40	-0,42	0,062	0,16	0,12	0,25	-0,23	0,16	-0,17
квітень	0,49	-0,55	0,066	0,17	0,13	0,27	-0,26	0,17	-0,16
липень	0,36	-0,48	0,061	0,16	0,12	0,25	-0,24	0,15	-0,14
жовтень	0,66	-0,66	0,060	0,15	0,12	0,25	-0,23	0,14	-1,45

Таблиця 5 - Гістограми стрибків потужності (висота 66 м).

діапазон	Частота			
	січень	квітень	липень	жовтень
> -0,6	0	1	1	1
-0,6...-0,5	0	1	0	2
-0,5...-0,4	1	0	1	1
-0,4...-0,3	5	6	0	4
-0,3...-0,2	23	29	33	20
-0,2...-0,1	187	191	159	151
-0,1...0,0	2081	2004	2078	2134
0,0...0,1	1946	1856	1994	1985
0,1...0,2	184	182	158	131
0,2...0,3	28	41	34	27
0,3...0,4	7	6	5	5
0,4...0,5	1	2	0	1
0,5...0,6	0	0	0	1

Можна пересвідчитися, що основні закономірності розподілу стрибків потужності справедливі на обох висотах. Цей висновок є важливим при проведенні передінвестиційних досліджень для проектів будівництва ВЕС. Прийняті в даний час правила (законодавчі чи у вигляді сталої практики) передбачають не менш як річний цикл вимірювання швидкості вітру безпосередньо на майданчику планованого будівництва. При цьому висота розташування датчиків швидкості вітру має бути якомога ближчою до осі ротора ВЕУ, які проектуються до встановлення, проте не менше як на 2/3 цієї висоти. Отже, досліджені дані свідчать про допустимість мінімальної в заданих межах висоти вимірів, що суттєво впливає на вартість вимірювання.



Розглянемо, наскільки тривалими є процеси зміни потужності, для чого аналогічним чином розглянемо стрибки потужності за 30 хвилин та за одну годину. Використаємо дані вимірів на висоті 94 м. Розрахунок величини стрибків виконується методом ковзного вікна, тобто розглядаються всі можливі різниці потужності з відповідним зсувом по часу. Результати наведено в табл. 6 та 7.

Порівнюючи ці результати з даними таблиць 1 та 3 стосовно стрибків за 10 хвилин, можна зробити наступні висновки.

Зі зростанням довжини часового інтервалу розмах змін потужності природно зростає, але дещо повільніше, тобто імовірність тривалого зростання чи спаду потужності зменшується. Це характерно як для абсолютного максимуму стрибків, так і для імовірного з різним ступенем достовірності (рис. 2). Характер розподілу стрибків при цьому якісно такий же, тобто відмінність від нормального за величиною ексцесу [3] зберігається, хоча коефіцієнт ексцесу дещо зменшується.

Таблиця 6 - Показники розподілу стрибків потужності ВЕУ за 30 хв

місяць	$\Delta P_{\max}$	$\Delta P_{\min}$	$\sigma$	$2,58 \cdot \sigma$	$1,96 \cdot \sigma$	max 0,99	min 0,99	max 0,95	min 0,95
січень	0,715	-0,640	0,104	0,267	0,203	0,39	-0,37	0,24	-0,23
квітень	0,724	-0,610	0,115	0,297	0,225	0,50	-0,43	0,26	-0,25
липень	0,649	-0,470	0,105	0,270	0,205	0,39	-0,36	0,25	-0,25
жовтень	0,516	-0,665	0,083	0,214	0,163	0,34	-0,32	0,19	-0,19

Таблиця 7 - Показники розподілу стрибків потужності ВЕУ за 1 год

місяць	$\Delta P_{\max}$	$\Delta P_{\min}$	$\sigma$	$2,58 \cdot \sigma$	$1,96 \cdot \sigma$	max 0,99	min 0,99	max 0,95	min 0,95
січень	0,82	-0,74	0,142	0,367	0,279	0,48	-0,49	0,31	-0,30
квітень	0,85	-0,80	0,157	0,406	0,309	0,60	-0,57	0,36	-0,35
липень	0,80	-0,77	0,146	0,376	0,285	0,50	-0,49	0,34	-0,32
жовтень	0,72	-0,76	0,111	0,285	0,217	0,42	-0,43	0,26	-0,25

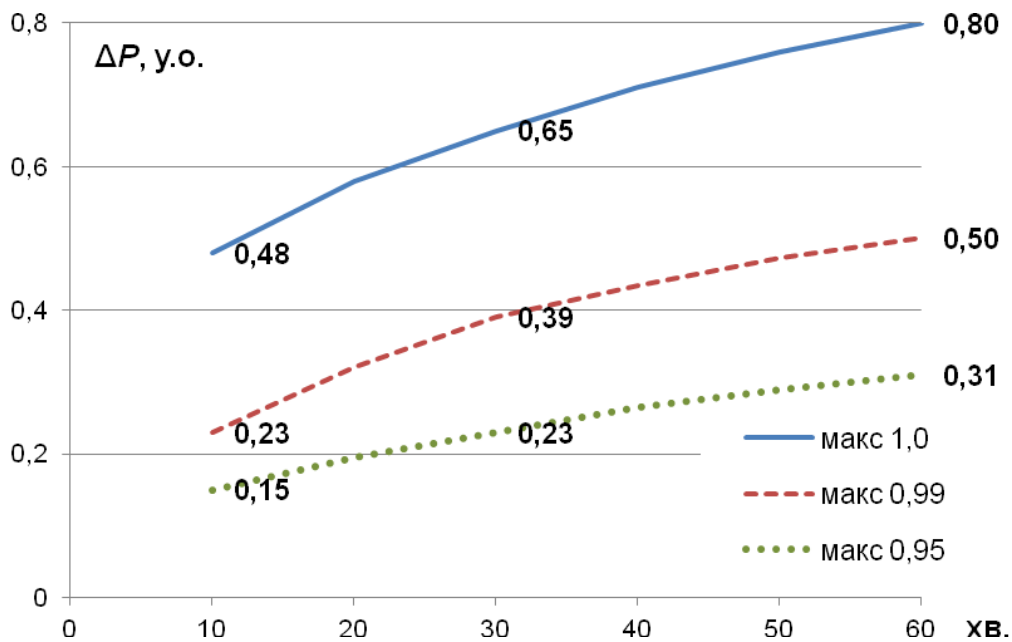


Рис. 2. Максимальне значення стрибків потужності з різною імовірністю

**Висновок.** Досліджені показники вітрового режиму дозволяють точніше спрогнозувати роботу вітроелектричної станції в досліджуваному регіоні та її вплив на характер постачання електроенергії при роботі у складі централізованої чи локальної енергосистеми. При цьому перелік досліджених параметрів не є вичерпним, потреба в додаткових дослідженнях визначається особливостями роботи енергосистеми як в частині генерування, так і споживання електроенергії.

### Список використаних джерел

1. Нова Директива з енергоефективності: шанс для України підтвердити курс на енергоощадність [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.ukrenergiaudit.org/ua/novini/460-nova-direktiva-z-energoefektivnosti-shans-dlya-ukrajini-pidtvrditi-kurs-na-energooshchadnist.html>

2. Розпорядження Кабінету Міністрів України "Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року" від 24 липня 2013 – № 1071-р. // Урядовий кур'єр від 29.01.2014. – № 17.

3. ГОСТ Р ИСО 5479-2002: Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения



## **ОЦЕНКА БРОСКОВ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

**Кузнецов Н.П., Лисенко О.В.**

*Аннотация* – проведена оценка колебаний мощности ветрового потока на юге Украины по двухлетнему массиву 10-минутных измерений скорости и направления ветра метеопостом Ботиевской ВЭС, Приазовского района Запорожской области. В частности, проведен расчет и анализ темпов изменения скорости ветра и, как следствие, генерирующей мощности, что являются важными показателями стабильной работы электрической сети.

## **ESTIMATION OF THE GENERATING CAPACITY OF WIND POWER PLANTS**

**M. Kuznietsov, O. Lysenko**

### *Summary*

**In the article, an estimation of the wind power fluxes in the south of Ukraine for a two-year array of 10-minute measurements of wind speed and direction by the weather checkpoint of the Botievskaya wind farm, the Priazovski district of the Zaporozhye region was carried out. In particular, the calculation and analysis of the rate of change in wind speed and as a consequence of the generating capacity was shown, which are important indicators of the stable operation of the electrical network.**