

📍Головна / [APXIB HOMEPIB](#) / 2023 рік / Том 45, № 3 (2023)

Електронне моделювання

Том 45, №3 (2023)

<https://doi.org/10.15407/emodel.45.03>

ЗМІСТ

Математичне моделювання та обчислювальні методи

С.Є. Саух

[Концепція забезпечення жорсткої стійкості
електроенергетики України в умовах терористичних та
мілітарних загроз](#) 3-10

З.Х. Борукаєв, В.А. Євдокімов, К.Б. Остапченко

[Стан та перспективи організації децентралізованої
торгівлі електроенергією на регіональному рівні](#) 11-27

Інформаційні технології

А. М. Капітон, О.В. Скакаліна, Д.О. Тищенко, Т.М. Франчук

[СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО НАЛАШТУВАННЯ
КОНФІГУРАЦІЇ БЕЗПЕКИ МЕРЕЖЕВОГО ОБЛАДНАННЯ](#) 28-42

М.С. Кондратенко

[Використання технології блокчейну при побудові
ієрархічної структури на множині державних реєстрів для
захисту від підробки інформації](#) 43-56

О.В. Лебідь, С.С. Кіпоренко, В.Ю. Вовк

[Використання технологій штучного інтелекту в сільському
господарстві: європейський досвід та застосування в
Україні](#) 57-71

Застосування методів та засобів моделювання

М.О. Ковальчук, О.В. Маєвський

[Математичне моделювання стохастичної динаміки
взаємодії студентів різних спеціальностей в процесі
інтегрованого навчання](#) 72-80

С.О. Гуриненко, Н.І. Бурау, В.О. Суржок Моделювання та аналіз складного руху автономного безпілотного підводного апарата	81-91
Д.Є. Крикунов ОРГАНІЗАЦІЯ ЗАХИСТУ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ З КЛІЄНТ-СЕРВЕРНОЮ АРХІТЕКТУРОЮ	92-103
В.С. Подгуренко, О.М. Гетманець, В.Є. Терехов Межа максимальної ефективності роботи вітроелектричних установок із заданими типорозмірами у конкретних вітрокліматичних умовах	104-115
Р.І. Драгунцов, В.Ю. Зубок, Моделювання загроз кібербезпеці у зв'язку з масовими відключеннями електропостачання та потенційні заходи протидії	116-127

DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.03.104>
УДК 004.942:621.548:620.928

В.С. Подгуренко¹, канд. техн. наук, **О.М. Гетманець**², канд. фіз.-мат. наук,
В.Є. Терехов³, канд. техн. наук

¹ Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова
Україна, 54025, Миколаїв, пр-т Героїв Сталінграду, 9
e-mail: vspodgurenko@gmail.com;

² Національний університет ім. В.Н. Каразіна
Україна, 61000, Харків, майдан Свободи, 4
e-mail: getmanets54@gmail.com;

³ ТОВ УК «Вітряні парки України»
Україна, 89200, Перечин, вул. Промислова, 7а
e-mail: vl.terekhov86@gmail.com

Межа максимальної ефективності роботи вітроелектричних установок із заданими типорозмірами у конкретних вітрокліматичних умовах

За результатами моделювання характеристик потужності 115 вітроелектричних установок (ВЕУ) різних виробників потужністю від 0,85 до 8,0 МВт із застосуванням двопараметричного інтегрального розподілу Вейбула—Гніденка (IPBG) одержано систему рівнянь регресії для параметрів IPBG через основні типорозміри ВЕУ: номінальну встановлену потужність (НВП) генератора та діаметр вітрового колеса (ВК). Побудовано регресійну модель залежності середньої використаної потужності (СВП) ВЕУ від її основних типорозмірів для різних вітрокліматичних умов. Визначено область існування можливих значень типорозмірів. Виявлено наявність локальних максимумів розподілу СВП за НВП при фіксованих значеннях діаметру ВК. Знайдено аналітичний зв'язок між оптимальними типорозмірами ВЕУ у різних вітрокліматичних умовах. Одержано певні обмеження для максимального діаметру ВК в залежності від значень НВП. Теоретично встановлено середнє значення стартової швидкості вітру $V_{ст} \geq 3,37$ м/с, при якому ВЕУ починає працювати.

К л ю ч о в і с л о в а: вітроелектрична установка, розподіл Вейбула—Гніденка, типорозмір, встановлена потужність, вітрове колесо, оптимізація.

Підбір ефективних промислових вітроелектричних установок (ВЕУ) під конкретні вітрові умови будівництва вітрових електричних станцій (ВЕС) є однією із найважливіших задач вітроенергетики. Оцінка ефективності їх роботи проводиться з метою виявлення таких значень основних параметрів ВЕУ, які дозволяють виробляти максимально можливу

кількість електроенергії із мінімальними капіталовкладеннями в заданих вітрокліматичних умовах.

Результатами попередніх досліджень [1] на основі аналізу параметрів 50 типів ВЕУ були підтверджені припущення, опубліковані у роботі [2], щодо кривих потужності (КП) ВЕУ $P(V)$, які добре описуються інтегральним розподілом Вейбула—Гніденка (ІРВГ) [3, 4]:

$$P(V) = P \int_0^V f(V) dV = P \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{b_t} \right)^{c_t} \right] \right\}, \quad (1)$$

де V — швидкість вітру; P — номінальна встановлена потужність (НВП) електрогенератора ВЕУ; b_t — параметр масштабу; c_t — параметр форми ІРВГ (t — turbine).

На основі існуючої бази даних (БД) [5] визначено параметри b_t та c_t ІРВГ для 115 типів ВЕУ з типорозмірами в діапазоні НВП P ($0,85 \text{ МВт} \leq P \leq 8,0 \text{ МВт}$) та діаметрів вітрового колеса (ВК) D ($52 \text{ м} \leq D \leq 168 \text{ м}$). При цьому було застосовано пакет «Пошук рішення» програми Excel-2016. Результати наведено в таблиці.

Для зменшення внеску випадкової складової проведено попередню статистичну обробку БД методом ковзного середнього з шириною вікна $n = 6$ (при цьому розкид даних таблиці, або середня вибіркова дисперсія, зменшилася у шість разів). Таким чином отримано 110 точок для параметрів b_t і c_t згладженої вибірки.

На основі проведеного регресійного аналізу згладжених даних було одержано наступну систему рівнянь регресії для параметрів b_t і c_t через основні типорозміри ВЕУ P і D :

$$\begin{aligned} b_t &= 12,036 + 0,954 P - 0,0547 D \quad (R^2 = 0,917; \delta_c = 1,3 \%), \\ c_t &= c_c = 4,360 \quad (\delta_c = 2,9 \%), \end{aligned} \quad (2)$$

де R^2 — коефіцієнт детермінації; δ_c — середня відносна похибка регресії.

В роботах [1, 6] доведено, що значення коефіцієнта використання встановленої потужності ВЕУ (КВВП) залежить здебільшого від параметра $k = (b_w/b_t)^{c_t}$, де b_w — масштаб диференційного розподілу Вейбула—Гніденка (ДРВГ) для швидкості вітру (w — wind):

$$\text{КВВП} = 1 - \int_0^\infty e^{-ky^p} e^{-y} dy, \quad (3)$$

де $y = (v/b_w)^{c_w}$; $k = (b_w/b_t)^{c_t}$; $p = c_t/c_w$; c_w — параметр форми ДРВГ для вітру.

№ з/п	BEY	Коефіцієнти ІРВГ та типорозміри різних моделей BEY					№ з/п	BEY	Коефіцієнти ІРВГ та типорозміри різних моделей BEY				
		P , МВт	D , м	b , м/с	c	R^2			P , МВт	D , м	b , м/с	c	R^2
1	Gamesa G52	0,85	52	9,706	4,075	0,989	59	GE 2.5-120	2,50	120	7,806	4,304	0,993
2	Gamesa G58	0,85	58	8,959	4,449	0,985	60	SANY SE131	2,50	131	7,387	4,787	0,945
3	Bonus B54/1000	1,00	54	10,183	3,802	0,996	61	SG 2500.131	2,50	131	7,546	4,789	0,956
4	Enercon E-58/10.58	1,00	58	9,568	4,364	0,984	62	Enercon E-82	3,00	82	11,016	3,684	0,992
5	NEG Micon NM 60	1,00	60	9,965	3,529	0,981	63	Enercon E-101	3,00	101	9,187	4,630	0,965
6	Fuhrländer FL MD 77	1,00	77	7,924	4,279	0,982	64	Leitwind LTW-101	3,00	101	9,603	3,901	0,997
7	LTW77 1000	1,00	86	7,421	4,543	0,992	65	Vestas V112	3,00	112	8,831	4,575	0,972
8	Suzlon S.64-1250	1,25	64	9,837	4,100	0,996	66	Enercon E-115	3,00	115	8,559	4,220	0,990
9	Nordex N60	1,30	60	10,672	3,809	0,989	67	Nordex N117	3,00	117	8,522	4,390	0,989
10	AN Bonus 1300/62	1,30	62	10,239	3,671	0,993	68	W2E 3.0-120	3,00	120	8,359	4,405	0,982
11	Enercon E-66/15.66	1,50	66	10,150	4,378	0,979	69	Vensys 120/3000	3,00	120	8,424	4,193	0,979
12	Südwind S-70	1,50	70	9,680	4,538	0,985	70	SANY SE12130	3,00	121	8,112	4,690	0,941
13	GE 1.5s	1,50	70,5	9,462	4,718	0,978	71	Senvion 3.0M122	3,00	122	8,287	4,364	0,984
14	Fuhrländer FL MD 77	1,50	77	9,051	4,132	0,987	72	Vestas V126	3,00	126	8,098	4,653	0,967
15	Vestas V66-1.65	1,65	66	10,764	3,805	0,976	73	SANY SE12730	3,00	127	7,831	4,736	0,950
16	Vestas V66-1.75	1,75	66	10,192	3,829	0,976	74	Nordex N131	3,00	131	7,881	4,387	0,988
17	Bonus B76/2000	2,00	76	10,133	4,150	0,993	75	W2E 138	3,00	138	7,699	4,313	0,993
18	Gamesa G80	2,00	80	9,680	4,046	0,993	76	Nordex N100 3.3	3,30	100	9,795	4,367	0,991
19	Enercon E-82 E2	2,00	82	9,237	4,349	0,990	77	Vestas V112-3.3	3,30	112	9,088	4,446	0,971
20	SANY SE8220	2,00	82	10,080	4,520	0,973	78	Siemens SWT 3.2	3,20	113	8,737	4,351	0,915
21	Gamesa G83	2,00	83	9,598	4,155	0,990	79	Senvion 3.2M	3,20	114	8,755	4,439	0,981
22	SANY SE8720	2,00	87	9,065	4,384	0,970	80	Vestas V117-3.3	3,30	117	8,808	4,598	0,988

Продовження таблиці

№ з/п	ВЕУ	Коефіцієнти ІРВГ та типорозміри різних моделей ВЕУ					№ з/п	ВЕУ	Коефіцієнти ІРВГ та типорозміри різних моделей ВЕУ				
		P, МВт	D, м	b, м/с	c	R ²			P, МВт	D, м	b, м/с	c	R ²
23	Vestas V90	2,00	90	8,961	4,189	0,979	81	W2E-3.2	3,20	120	8,616	4,163	0,967
24	Leitwind LTW90	2,00	90	8,887	4,262	0,978	82	Senvion 3.2	3,20	122	8,537	4,207	0,996
25	Fuhrlande WTU 2.0-93	2,00	93	8,802	4,696	0,980	83	Vestas V126 3.3	3,30	126	8,371	4,595	0,977
26	SANY SE9320	2,00	93	8,577	4,680	0,946	84	GE 3.2-130	3,23	130	8,230	4,147	0,980
27	FWT 93/2000	2,00	93	8,663	4,231	0,997	85	Siemens SWT-3.3	3,30	130	8,192	4,539	0,967
28	Gamesa G97	2,00	97	8,334	4,479	0,987	86	Nordex N131 3.3	3,30	131	8,116	4,384	0,985
29	WTU 2.0-100	2,00	100	8,445	4,507	0,987	87	Gamesa G132-3.3	3,30	132	8,062	4,421	0,980
30	SANY SE10020	2,00	100	8,039	4,805	0,952	88	Enercon E-101 3.5	3,50	101	9,834	4,198	0,965
31	Senvion MM100	2,00	100	8,202	4,618	0,980	89	Vestas V112-3.45	3,45	112	9,109	4,567	0,993
32	Leitwind LTW101	2,00	101	8,059	4,696	0,957	90	eno 114-3.5	3,50	114	9,221	4,656	0,976
33	Leitwind LTW104	2,00	104	7,991	4,664	0,949	91	Senvion 3.4M	3,40	114	8,952	4,395	0,985
34	Gamesa G114	2,00	114	7,471	4,485	0,991	92	Nordex N117 3.6	3,60	117	9,030	4,281	0,979
35	SANY SE11520	2,00	115	7,437	4,787	0,937	93	Vestas V117 3.45	3,45	117	8,845	4,627	0,978
36	SANY SE12120	2,00	121	6,922	4,894	0,945	94	W2E 3.5-120	3,50	120	8,548	3,779	0,981
37	Nordex N80	2,50	80	10,685	4,155	0,987	95	Siemens SWT-3.6	3,60	120	8,976	4,443	0,971
38	Nordex N90	2,50	90	9,508	4,163	0,980	96	eno 126 3.5	3,50	126	8,649	4,160	0,990
39	FL 2500-90	2,50	90	9,632	4,528	0,981	97	Vestas V126 3.45	3,45	126	8,442	4,582	0,980
40	HEAG HW3-90	2,50	90	9,785	4,420	0,981	98	Siemens SWT-3.6	3,60	130	8,412	4,412	0,967
41	HEAG HW3-97	2,50	97	9,217	4,740	0,962	99	Nordex N131 3.6	3,60	131	8,311	4,497	0,989
42	FL 2500-100	2,50	100	8,791	4,656	0,978	100	Vestas V136 3.45	3,45	136	8,004	4,645	0,981
43	GE 2.5-100	2,50	100	9,076	4,365	0,993	101	GE 3.4-137	3,40	137	8,098	4,114	0,986

Закінчення таблиці

№ з/п	ВЕУ	Коефіцієнти ІРВГ та типорозміри різних моделей ВЕУ					№ з/п	ВЕУ	Коефіцієнти ІРВГ та типорозміри різних моделей ВЕУ				
		P , МВт	D , м	b , м/с	c	R^2			P , МВт	D , м	b , м/с	c	R^2
44	Nordex N100	2,50	100	8,794	4,445	0,979	102	Senvion 3.4M-140	3,40	140	7,919	4,387	0,993
45	Vensys 100/2500	2,50	100	9,148	4,252	0,972	103	Enercon E-126 EP4	4,20	126	9,232	3,950	0,995
46	Leitwind LTW 101	2,50	101	8,768	4,447	0,979	104	Enercon E-141 EP4	4,20	141	8,655	3,865	0,995
47	GE 2.5-103	2,50	103	8,810	4,421	0,987	105	E 112/4.5.114	4,50	114	9,889	4,463	0,966
48	HEAG HW3-103	2,50	103	8,835	4,680	0,960	106	Gamesa G128	4,50	128	9,155	4,327	0,979
49	WDRVM WD 2.5-103	2,50	103	9,118	4,575	0,973	107	W2E-151/4.5	4,50	151	8,291	4,113	0,993
50	WTU 2.5-104	2,50	104	8,741	4,611	0,980	108	W2E-155/4.5fc	4,50	155	8,452	3,795	0,997
51	LTW 104	2,50	104	8,643	4,546	0,953	109	W2E-151/4.8	4,80	151	8,481	4,242	0,980
52	Vensys 109/2500	2,50	109	8,596	4,357	0,970	110	Gamesa G128	5,00	128	9,523	3,962	0,996
53	HEAG HW3-110	2,50	110	7,316	4,391	0,948	111	Gamesa G132	5,00	132	9,317	4,065	0,996
54	W2E-110	2,50	110	8,413	4,332	0,992	112	W2E-165/5.2	5,20	165	8,290	4,113	0,993
55	Vensys 112	2,50	112	8,434	4,371	0,971	113	Enercon E-126	7,58	126	10,981	3,904	0,997
56	Gamesa G114	2,50	114	8,110	4,396	0,994	114	Vestas V164-8.0	8,00	164	9,480	4,575	0,972
57	Enercon E115	2,50	115	7,995	4,405	0,990	115	Aerodyn 8.0-168	8,00	168	9,824	4,047	0,946
58	SANY SE115	2,50	115	8,050	4,572	0,947							

Враховуючи, що $c_t \approx \text{const}$ (2), для КВВП визначальним є відношення $x = b_t/b_w$. З використанням рівняння регресії (2) для 110 точок, що залишилися після попереднього згладжування БД, у випадку слабкого ($b_w = 6$ м/с), помірного ($b_w = 8$ м/с) та сильного ($b_w = 10$ м/с) вітрів (за Стандартом [7]) отримано $110 \times 3 = 330$ значень x . Для кожного з них та двох крайніх значень параметра форми ДРВГ для розподілу швидкості вітру $c_w = 2,1$ і $c_w = 2,5$ було розраховано $110 \times 3 \times 2 = 660$ значень КВВП двома способами:

1) методом чисельного інтегрування виразу (3);

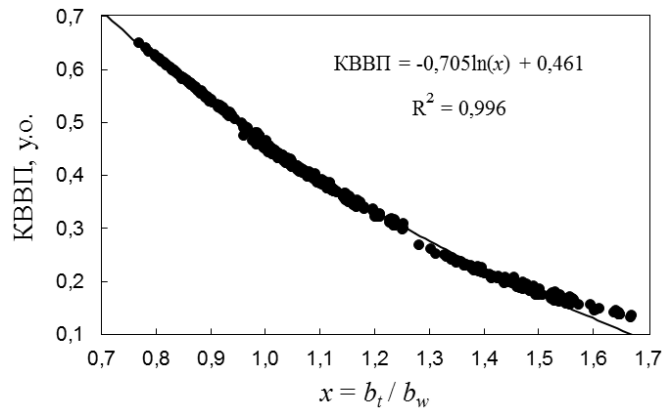


Рис. 1. Залежність КВВП від параметру b_t / b_w

2) за допомогою рекурентної формули з роботи [1], в якій підсумували 100 членів. Результати збігалися з високою точністю.

Отримані 660 точок для пари значень x і КВВП (тобто кореляційне поле) було нанесено на графік (рис. 1), а потім на їх основі побудовано логарифмічну регресію із застосуванням команди «додати лінію тренду» в програмі MS Excel-2016:

$$\text{КВВП} = -0,705 \ln(x) + 0,461. \quad (4)$$

Крива логарифмічної регресії і значення коефіцієнта детермінації для неї ($R^2 = 0,996$) також наведено на рис. 1, на якому видно, що для сучасних ВЕУ діапазон зміни КВВП перебуває в межах

$$0,1 < \text{КВВП} < 0,7. \quad (5)$$

Підставляючи в (4) вираз (2) (для b_t), одержуємо наступне рівняння регресії для КВВП:

$$\text{КВВП} = \left[-0,705 \ln \left(\frac{12,036 + 0,954P - 0,0547D}{b_w} \right) + 0,461 \right]. \quad (6)$$

Рівняння (6) дозволяє визначати КВВП за основними типорозмірами ВЕУ.

Коефіцієнт використання встановленої потужності є відношенням фактичного виробітку електричної енергії ВЕУ в заданих вітрових умовах до технічно можливого максимального його значення. Слід зазначити, що при виборі ВЕУ не варто орієнтуватися тільки на параметр КВВП, а варто зосередити увагу на виробітку максимально можливої кількості електроенергії. Тому для визначення оптимальних типорозмірів ВЕУ слід розглядати питання максимізації середньої потужності генерування електроенергії за певних вітрокліматичних умов. Цю потужність назовемо

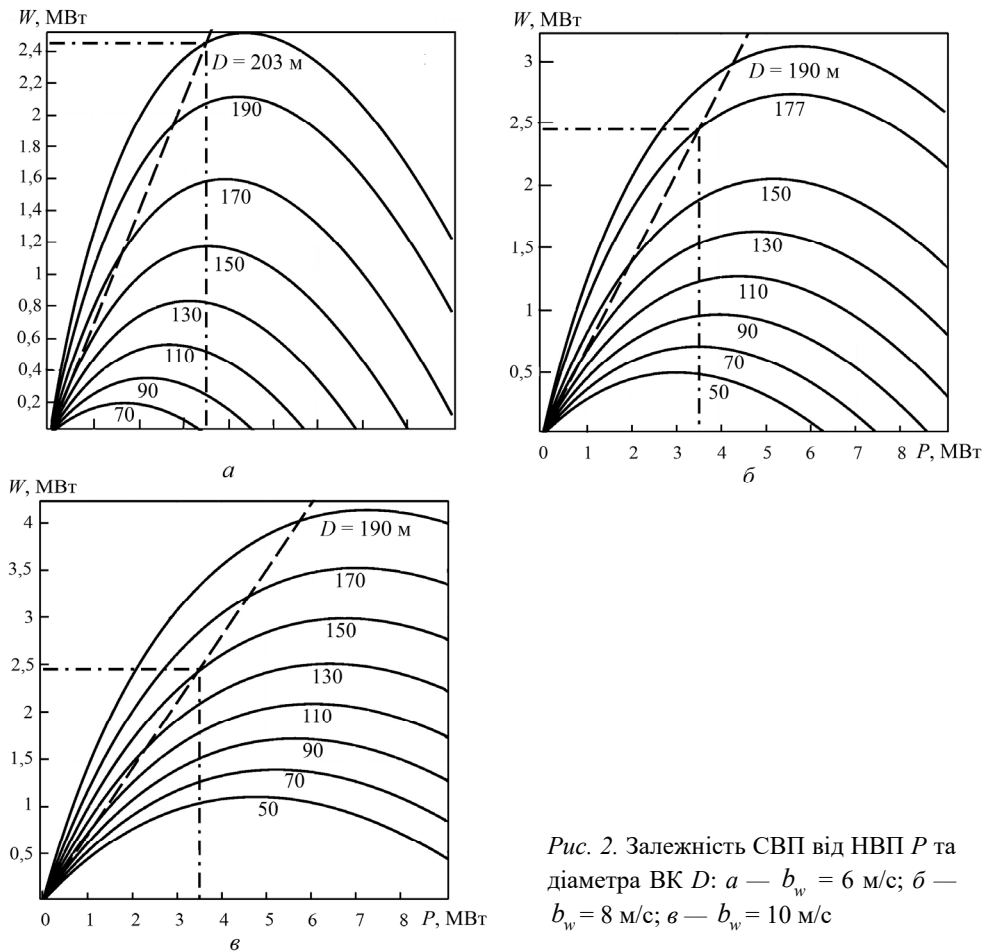


Рис. 2. Залежність СВП від НВП P та діаметра ВК D : а — $b_w = 6$ м/с; б — $b_w = 8$ м/с; в — $b_w = 10$ м/с

середньою використаною потужністю W (СВП) і обчислимо її з урахуванням (6) за формулою

$$W(P, D) = P \text{ КВВП} = P \left[-0,705 \ln \left(\frac{12,036 + 0,954P - 0,0547D}{b_w} \right) + 0,461 \right]. \quad (7)$$

На рис. 2 наведено криві СВП $W(P, D)$, побудовані за рівнянням (7) при різних значеннях діаметра вітрового колеса (ВК) D для слабких, помірних та сильних вітрів. На цих графіках штриховою лінією показано обмеження на СВП:

$$W(P, D) < 7P, \quad (8)$$

яке витікає з обмеження для КВВП (5) і формули (7). Тобто допустима область зміни типорозмірів ВЕУ P і D повинна бути розташована правіше і нижче за цю лінію.

Це обмеження суттєво впливає на типорозміри ВЕУ. Як приклад розглянемо ситуацію, коли для різних вітрокліматичних умов на певних висотах розташування осі ВК на різних ВЕУ були встановлені електрогенератори з однаковим значенням НВП $P = 3,5$ МВт. Виникає питання: за яких умов може бути досягнуто максимальне значення СВП $W_{\max} = 3,5 \cdot 0,7 = 2,45$ МВт для кожної ВЕУ? Значення $P = 3,5$ МВт і $W_{\max} = 3,5 \cdot 0,7 = 2,45$ МВт на рис. 2 показано штрих-пунктирними лініями.

Графіки, наведені на рис. 2, свідчать, що для слабких вітрів ($b_w = 6$ м/с) СВП сягає значення $W_{\max} = 2,45$ МВт при дуже великому значенні діаметра ВК: $D = 203$ м; для помірних вітрів ($b_w = 8$ м/с) максимум СВП досягається при $D = 177$ м, для сильних ($b_w = 10$ м/с) — при $D = 150$ м.

Найважливішим результатом проведеного дослідження є виявлена вперше наявність локальних максимумів СВП при певних значеннях типорозмірів ВЕУ P і D , що добре видно на рис. 2. Відомості щодо їх існування відсутні в сучасних літературних джерелах. Це відкриває нову можливість оптимізації вироблення ВЕУ за даним критерієм.

Задача оптимізації потребує визначення локального екстремуму (максимуму) функції двох змінних $W(P, D)$. З першої необхідної умови існування екстремуму витікає наступне рівняння:

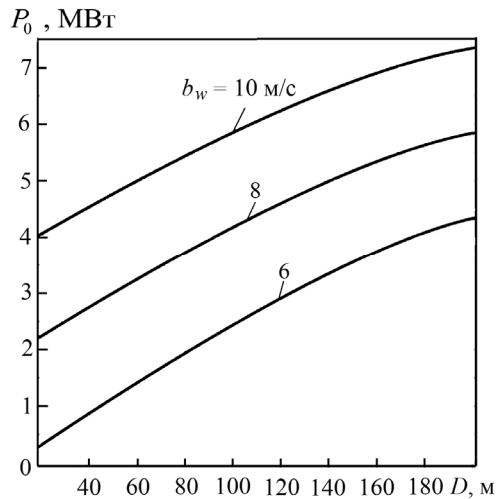
$$\frac{\partial W}{\partial P} = -0,705 \ln \left(\frac{12,036 + 0,954P - 0,0547D}{b_w} \right) + 0,461 - \frac{0,673P}{12,036 + 0,954P - 0,0547D} = 0. \quad (9)$$

Його точний розв'язок для визначення залежності оптимального значення НВП P_0 від діаметра ВК D має вигляд:

$$P_0 = 1,048e^{\text{LambertW} \left(\frac{12,036 - 0,0547D}{b_w} \right) - 0,346b_w} + 0,0573D - 12,616, \quad (10)$$

де LambertW — W -функція Ламберта. Рівняння (10) визначає також залежність P_0 від масштабу розподілу швидкостей вітру b_w , при яких $W(P, D)$ набуває локального максимуму, тобто координати усіх точок максимумів функції $W(P, D)$ в площині (P, W) (див. рис. 2).

Рис. 3. Залежність між оптимальною НВП ВЕУ P_0 і діаметром ВК D при різних значеннях b_w



За рівнянням (9) також можна визначити оптимальні типорозміри ВЕУ у більш простому, але декілька менш точному вигляді, наприклад за допомогою пакету «Пошук рішення» програми MS Excel-2016. Обмеживши діапазон D до $80 \text{ м} \leq D \leq 160 \text{ м}$, що повністю охоплює всі промислові ВЕУ ВЕС України, та знайшовши оптимальні значення P_0 за різних D та b_w , отримаємо наступне рівняння множинної лінійної регресії:

$$P_0 = 0,0204D + 0,8324b_w - 4,5651 \quad (R^2 = 0,998; \delta_c = 1,4 \%),$$

яке дозволяє швидко порівнювати ВЕУ за рівнем ефективності їх роботи.

На рис. 3 наведено графіки залежності (10) при різних значеннях швидкості вітру b_w . Порівнюючи ці графіки з графіками на рис. 2, бачимо, що вони добре описують положення максимумів функції СВП $W(P, D)$.

Друга необхідна умова існування локального екстремуму функції $W(P, D)$ полягає в наступному:

$$\frac{\partial W}{\partial D} = \frac{0,04764P}{12,036 + 0,954P - 0,0547D} = 0. \quad (11)$$

Це рівняння має єдиний розв'язок для P , а саме $P = 0$ при $D < 220,04 \text{ м}$, який визначає мінімум функції $W(P, D)$ (7), що добре видно на рис. 2.

Рис. 2 свідчить про те, що $\frac{\partial W}{\partial D} > 0$. Тому з формули (11) маємо верхнє обмеження на діаметр ВК D в залежності від НВП P :

$$D < \frac{12,036 + 0,954P}{0,0547} = 220,04 + 17,44P \text{ (м)}. \quad (12)$$

Нерівність (12) не залежить від швидкості вітру і свідчить про те, що діаметр ВК не можна безмежно збільшувати.

Якщо у рівняння (9) підставити значення $P = 0$, то отримаємо мінімальне значення D :

$$D = \frac{12,036 - e^{\frac{0,461b_w}{0,705}}}{0,0547}.$$

З умови $D > 0$ витікає «стартове» значення масштабу швидкості вітру

$$b_w \geq \frac{\ln(12,036) 0,705}{0,461} \approx 3,80 \text{ м/с},$$

звідки середня «стартова» швидкість вітру складає $V_c \geq 3,37 \text{ м/с}$ (в діапазоні $2,1 < c_w < 2,5$). За менших значень середньої швидкості вітру БЕУ взагалі не вироблятиме електроенергію.

Слід зазначити, що при виборі БЕУ не варто керуватися лише виявленими і вперше математично описаними межами максимальної ефективності її роботи. Адже в реальних умовах підвищення технічної досконалості доцільно лише за відповідного економічного обґрунтування. Саме тому типорозміри БЕУ діючих ВЕС суттєво відрізняються від розрахункових оптимальних значень. Проте вперше розроблена математична модель середньої використаної потужності БЕУ у поєднанні із математичною моделлю вартісних показників БЕУ із заданими типорозмірами стануть основою комплексного аналізу техніко-економічної ефективності функціонування БЕУ у конкретних вітрокліматичних умовах.

Висновки

Існуюче поняття ефективності роботи БЕУ було узагальнено у вигляді математичної залежності середньої використаної потужності (СВП) БЕУ від основних її типорозмірів: НВП P , діаметра ВК D з урахуванням параметра масштабу функції розподілу Вейбула—Гніденка для певних вітрокліматичних умов. За результатами обчислень СВП для різних значень типорозмірів БЕУ у випадку слабких, помірних та сильних вітрів вперше виявлено наявність локальних максимумів СВП при певних значеннях типорозмірів БЕУ. Задачу їх визначення було вирішено за допомогою побудови відповідної залежності оптимального значення НВП від діаметра ВК D в заданих вітрокліматичних умовах, що відкриває нову можливість оптимізації виробітку БЕУ за даним критерієм.

Результати статистичної обробки показників 115 БЕУ різних світових виробників довели існування обмеження максимального діаметра ВК від НВП БЕУ, що визначає верхню межу діапазону раціональних розмірів ВК для БЕУ заданої НВП, а також дозволили встановити мінімальне значення необхідної швидкості вітру для їх роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Подгуренко В.С., Гетманець О.М., Терехов В.Є. Метод оцінювання коефіцієнта використання встановленої потужності вітрової електричної установки // Електронне моделювання. 2021, **43**, № 2, с. 37—51. URL: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.02.037> (дата звернення: 17.05.2023).
2. Bokde N., Feijóo A., Villanueva D. Wind Turbine Power Curves Based on the Weibull Cumulative Distribution Function // *Applied Sciences*. 2018, **8**, № 10, с. 1757. URL: <https://doi.org/10.3390/app8101757> (дата звернення: 17.05.2023).
3. Weibull W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability // *Journal of Applied Mechanics*. 1951, Vol. 18, no. 3, pp. 293—297. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4010337> (дата звернення: 17.05.2023).
4. Гнеденко Б.В. Предельные законы для сумм независимых случайных величин // *Успехи математических наук*, 1944, № 10, с. 115—165.
5. Wind-turbine-models.com. © 2011—2023 Lucas Bauer & Silvio Matysik. URL: <https://en.wind-turbine-models.com> (дата звернення: 17.05.2023).
6. Подгуренко В.С., Гетманець О.М., Терехов В.Є., Пелихатый Н.М. Метод определения коэффициента использования установленной мощности для ветровой энергетической установки в условиях Северного Причерноморья // *Актуальні проблеми безпеки на транспорті, в енергетиці, інфраструктурі: матеріали I Міжнар. наук.- практ. конф. м. Херсон, 8—11 вер. 2021 р. / Морський інст. ім. контр-адм. Ф.Ф. Ушакова*, 2021, с. 202—206.
7. IEC 61400-3-1:2019. Wind energy generation systems. Чинний від 05.04.2019 р. Вид. офіц. Geneva: IEC, 2019, 151 с.

Отримано 08.05.2023

REFERENCES

1. Podgurenko V.S., Getmanets O.M. & Terekhov V.E. (2021). The method of estimating the coefficient of use the installed capacity of a wind turbine. *Electronic modeling*, 43 (2), 37–51.
2. Bokde N., Feijoo A. & Villanueva D. (2018). Wind Turbine Power Curves Based on the Weibull Cumulative Distribution Function. *Applied Sciences*, 8, 1–18.
3. Weibull W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18(3), 293–297.
4. Gnedenko B. (1944). Limit laws for sums of independent random variables. *Successes in Mathematical Sciences*, 10, 115–165.
5. Wind-turbine-models.com. © 2011–2023 Lucas Bauer & Silvio Matysik. URL: <https://en.wind-turbine-models.com>. (Accessed: 17.05.2023).
6. Podgurenko V.S., Getmanets O.M., Terekhov V.E. & Pelikhaty N.M. (2021). Method for determining the installed capacity utilization factor for a wind power plant in the conditions of the Northern Black Sea region. *Proceedings of the 1st international scientific and practical conference "Actual problems of security in transport, energy, infrastructure"*, 8–11 Sept. Kherson: Maritime Rear Admiral F.F. Ushakov Institute. 202–206.
7. IEC. (2019). Wind energy generation systems. IEC 61400-3-1:2019.

Received 08.05.2023

V.S. Podgurenko, O.M. Getmanets, V.Ye. Terekhov

THE LIMIT OF THE WIND TURBINE MAXIMUM EFFICIENCY
WITH GIVEN SIZES IN SPECIFIC WIND CONDITIONS

In the paper, the parameters of 115 types of existing wind turbines (WT) were analyzed and their power curves were modeled by using the Weibull cumulative distribution function (CDF). On the basis of these data, regression equations were obtained for the CDF parameters for the power curves of WT due to their main sizes: the nameplate capacity of the generator P and the rotor D . Based on the analysis of the obtained 115 WT CDF parameters and main sizes, the regression model of the WT average used power (AUP) in specific wind conditions has been built. The area of existence of possible values of main sizes P and D is defined. The presence of local maxima in the distribution of AUP by nameplate capacity at fixed values of the rotor diameters has been revealed. An analytical relationship was found between the optimal values of WT main sizes in different wind conditions. Certain restrictions were obtained for the maximum rotor diameter depending on the values of the nameplate capacity. The average starting wind speed of 3.37 m per s, at which the wind turbine starts working, has been determined theoretically.

Keywords: wind turbine, Weibull distribution function, main sizes, nameplate capacity, rotor, optimization.

ПОДГУРЕНКО Володимир Сергійович, канд. техн. наук, доцент Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. У 1964 р. закінчив Миколаївський кораблебудівний інститут. Область наукових досліджень — вітроенергетика.

ГЕТМАНЕЦЬ Олег Михайлович, канд. фіз.-мат. наук, доцент Національного університету ім. В.Н. Каразіна. У 1977 р. закінчив Харківський державний університет ім. М. Горького. Область наукових досліджень — математичне моделювання.

ТЕРЕХОВ Володимир Євгенович, канд. техн. наук, диспетчер ТОВ «Вітряні парки України». У 2010 р. закінчив Національний університет кораблебудування (м. Миколаїв). Область наукових досліджень — вітроенергетика.