

📍Головна / [АРХІВ НОМЕРІВ](#) / [2022 рік](#) / Том 44, № 4 (2022)

Електронне моделювання

Том 44, №4 (2022)

<https://doi.org/10.15407/emodel.44.04>

ЗМІСТ

Математичне моделювання та обчислювальні методи

ЛИСЕНКО О.І., ЧУМАЧЕНКО С.М., ЯКОВЛЄВ Є.О., ПІРІКОВ
О.В., ДЕРМАН В.А. 3-20

[Математична модель для індикації екологічного стану
природного середовища територій бойових дій із
застосуванням екосистемного підходу](#)

ВИННИЧУК С.Д., КОЛОМІЄЦЬ Є.А., КОЗЮК О.І. 21-27
[Модель та алгоритм розрахунку потокорозподілу в
центропланному баку системи наддуву і дренажу без
наявності дренажу та перепуску](#)

VATAMAN V., PETIK T., BEGLOV K. 28-40
[Mathematical model and method for automated power
control of a nuclear power plant](#)

Інформаційні технології

SERGIYENKO A., ROMANKEVICH V., SERHIYENKO P. 41-54
[Local Feature Extraction in High Dynamic Range Images](#)

ХРИСТИНЕЦЬ Н.А. 55-63
[Практичне дослідження програмних засобів кіберзахисту
в операційній системі Manjaro](#)

Застосування методів та засобів моделювання

ПОДГУРЕНКО В.С., КУЦАН Ю.Г., ГЕТМАНЕЦЬ О.М., ТЕРЕХОВ
В.Є. 64-78
[Результативність інвестиційної політики у
вітроенергетичний сектор України в контексті світових
тенденцій](#)

АБАКУМОВ А.І., ХАРЧЕНКО В.С.

Тестування на проникнення систем інтернету речей:
кіберзагрози, методи та етапи 79-104

НЕСТЕРЕНКО О.В., НЕТЕСІН І.Є.

Експертне формування електронного глосарію 105-120

ЄВДОКИМОВ В.А., ПОЛУХІН А.В.

Оптимізація доходу учасників ринку «на добу наперед»
через моделювання процесів визначення ціни на цьому
ринку 121-129

© 2024 ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України

Україна, 03164, Київ-164, вул. Генерала Наумова, 15

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ

DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.04.064>
УДК 004.942:621.548:620.928

В.С. Подгуренко¹, канд. техн. наук, **Ю.Г. Куцан**², д-р техн. наук,
О.М. Гетманець³, канд. фіз.-мат. наук, **В.Є. Терехов**⁴, канд. техн. наук

¹ Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова
Україна, 54050, Миколаїв, пр-т Героїв України, 9
e-mail: vspodgurenko@gmail.com;

² Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15
e-mail: kutsan.ug@ipme.kiev.ua;

³ Національний університет ім. В.Н. Каразіна
Україна, 61022, Харків, пл. Свободи, 4
e-mail: getmanets54@gmail.com;

⁴ ТОВ «Управляюча компанія «Вітряні парки України»
Україна, 01015, Київ, вул. Лаврська, 20
e-mail: vl.terekhov86@gmail.com

Результативність інвестиційної політики у вітроенергетичний сектор України в контексті світових тенденцій

Відсутність інформації щодо реальних результатів промислової експлуатації вітропарків України, існуючі тенденції приховування основних технічних характеристик встановлених мультимегаватних вітроелектричних установок (ВЕУ) та їх вартості створює непереборні труднощі в оцінці їх роботи. З огляду на результати досліджень еволюції основних параметрів ВЕУ та усередненої (загальносвітової) вартості одного мегавату їх потужності, вперше запропоновано оригінальні лінійні математичні моделі, які дозволяють визначати вартість ВЕУ із заданими основними параметрами (номінальною потужністю, діаметром та висотою осі вітроколеса) на будь-який рік експлуатації. Із застосуванням раніше розроблених та апробованих математичних моделей річних виробітків електроенергії ВЕУ різної потужності у вітрокліматичних умовах Північного Причорномор'я визначено вартісні показники вітропарків України на 2021 р. та виконано їх зіставлення з показниками провідних країн у вітроенергетиці.

Ключові слова: річний виробіток електроенергії, вартість, типорозміри ВЕУ.

Актуальність проблеми. Поява на початку 90-х років XX століття комерційної вітроенергетики зумовила бурхливий розвиток вітроелектричних установок (ВЕУ), що відбувається переважно внаслідок неперервного збільшення їх габаритних та енергетичних характеристик. Проте у

© Подгуренко В.С., Куцан Ю.Г., Гетманець О.М., Терехов В.Є., 2022

багаточисельних публікаціях щодо вітроенергетики основну увагу зосереджено саме на параметрі номінальної потужності ВЕУ, незважаючи на те, що за результатами проведених досліджень даний параметр є лише складовою частиною сукупності показників, які визначають результативність її роботи.

Україна має значні ресурси вітрової енергії та завдяки своїм природно-кліматичним умовам може вийти на одне з провідних місць у світі щодо використання енергії вітру [1]. Досягти заявлених високих результатів можна, лише обравши ВЕУ з оптимальним співвідношенням ціна—якість, яка виробляє електроенергію (ЕЕ) з найменшою собівартістю.

Промислова вітроенергетика України за десятирічний період розвитку, починаючи з перших ВЕУ номінальною потужністю 2,5 МВт, впритул наблизилася до позначки у 5 МВт. Але чи єдиний це шлях підвищення ефективності і чи придатний він для будівництва вітроелектричних станцій (ВЕС) у різних регіонах? Це питання залишається відкритим і потребує додаткових досліджень.

Оцінити результативність роботи працюючих вітропарків України заздалегідь дуже важко, адже знайти у відкритих джерелах будь-яку інформацію щодо результатів їх експлуатації у вітрокліматичних умовах України майже неможливо. Навіть у звітах української вітроенергетичної асоціації [2] основна увага приділяється лише кількості встановлених ВЕУ та їх моделям, але це не свідчить про те, скільки ЕЕ та за якою вартістю вони генерують. Даних щодо вартості ВЕУ у відкритому доступі немає. Виробники ВЕУ обмежують доступ до них через комерційні бази даних [3], а останнім часом з'явилася тенденція виробників ВЕУ не публікувати криві потужності (КП) своїх виробів, що істотно ускладнює проведення розрахунків виробітку ЕЕ.

Зважаючи на вказані складнощі, запропоновано оригінальну методику визначення вартості ВЕУ заданого типорозміру, а також вартості ЕЕ, яку вона виробляє, за наявними у відкритому доступі статистичними даними та розробленими математичними моделями [4].

За кілька років, що минуло з початку даного дослідження, в Україні було введено в експлуатацію нові ВЕУ, розроблені нові математичні моделі (ММ), а у літературі з вітроенергетики з'явилися нові статистичні дані. Отже, назріло питання проведення нової актуальної оцінки вартісних показників вітропарків України з подальшим співставленням її результатів із існуючими загальносвітовими тенденціями.

Постановка задачі. Для оцінки ефективності роботи ВЕУ в певних вітрових умовах у вітроенергетиці широко застосовуються наступні три критерії [5]:

- 1) обсяг річного виробітку ВЕУ Q , МВт · год;

- 2) коефіцієнт використання встановленої потужності (ВП);
- 3) вартість електроенергії C_{EE} , що виробляється ВЕУ (зазвичай у \$/кВт · год або €/кВт · год).

Вартість C_{EE} є найбільш комплексним техніко-економічним показником, який дозволяє оцінити вітроенергетичний проект з позиції інвестиційної привабливості. Сучасні промислові ВЕС є комерційними проектами, тому всі технічні показники ВЕУ необхідно розглядати передусім з позиції економічної ефективності.

Вартість ЕЕ визначається за формулою [6]

$$C_{EE} = ((\Phi C \cdot KB) + EB) / Q,$$

де ΦC — фіксована ставка зборів, тобто щорічне покриття капітальних фіксованих витрат; KB — початкові капітальні витрати на будівництво ВЕС. Відомо, що вартість ВЕУ C_T (т — турбіна) становить в середньому 75 % від KB [7, 8]: $KB = C_T / 0,75$; EB (англ. O&M) — річні експлуатаційні витрати; Q — річний виробіток ВЕУ.

Оскільки середньосвітові показники ΦC та EB щорічно публікуються у звітах [9—13], основною задачею даного дослідження є визначення вартості ВЕУ із заданими технічними характеристиками та її річного виробітку в українських вітрокліматичних умовах.

Визначення річного виробітку ВЕУ в умовах Північного Причорномор'я України. З огляду на складність отримання КП конкретної моделі ВЕУ за даними багаторічних вітрових вимірів у Північному Причорномор'ї України з використанням КП ВЕУ різних світових виробників було розроблено ММ річного виробітку ВЕУ заданого типорозміру (номінальної потужності P , діаметру D та висоти осі вітроколеса (ВК) H) наступного вигляду (тут Q визначено в одиницях МВт · год; P — у МВт; D та H — у метрах) [14, 15]:

для ВЕУ потужністю 1,5—3,2 МВт

$$Q_1 = -7126,25 + 1348,594 \cdot P + 97,52617 \cdot D + 28,81139 \cdot H; \quad (1)$$

для ВЕУ потужністю 3,5—8,0 МВт

$$Q_2 = -15260,7 + 1195,699 \cdot P + 137,2119 \cdot D + 73,08151 \cdot H. \quad (2)$$

Оскільки переважна більшість вітропарків України розташована на півдні України (табл. 1), отримані ММ (1), (2) дозволяють визначити обсяг їх річного виробітку ЕЕ за умов відсутності даних щодо вітрового потенціалу на місці їх розташування та КП ВЕУ.

Сукупний діапазон потужностей для ММ (1), (2) охоплює увесь модельний ряд ВЕУ, що експлуатуються у промислових вітропарках України, а проведенне зіставлення результатів теоретичних досліджень та промислової експлуатації переконливо довело правомірність та надійність застосування цих ММ [14, 15].

Таблиця 1. Потужність мультимегаватних ВЕУ станом на 31.12.2021 р.

Назва вітропарку (ВЕУ)	Суб'єкт господарювання	Встановлена / середня потужність, МВт	Кількість ВЕУ	Модель ВЕУ
<i>Миколаївська область</i>				
Очаківський	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	62,1 / 2,7	19 × 2,5	WTU 2,5
			2 × 3,3	WTU 3,3
			1 × 3,5	WTU 3,5
			1 × 4,5	WTU 4,5
Благодатний		14,3 / 3,6	2 × 2,5	WTU 2,5
			1 × 4,5	WTU 4,5
			1 × 4,8	WTU 4,8
Причорноморський		33,2 / 3,0	3 × 2,5	WTU 2,5
			2 × 3,0	WTU 3,0
			3 × 3,2	WTU 3,2
			2 × 3,3	WTU 3,3
			1 × 3,5	WTU 3,5
Південний		10,5	3 × 3,5	WTU 3,5
Щасливий		7,0	2 × 3,5	WTU 3,5
Швидкий		14,4	3 × 4,8	WTU 4,8
	ТОВ «Сінга Енерджі»	6,0	3 × 2,0	Vestas 2.0
Разом по області		147,5 / 3,0	49	
<i>Херсонська область</i>				
Новоросійська	ТОВ «Віндкрафт Україна»	9,225	3 × 3,075	V 112
Ставки		9,225	3 × 3,075	V 112
Берегова		12,3	4 × 3,075	V 112
Овер'янівська		68,4	19 × 3,6	V 136
Новотроїцька	ТОВ «Віндкрафт Таврія»	72, 6 / 3,63	12 × 3,65	V 126
			8 × 3,6	V 136
Мирненська	ТОВ «Віндкрафт Каланчак»	163,0	35 × 4,2	V 150
			4 × 4,0	V 150
Сиваська	ТОВ «Сивашенерго-пром» / NBT	245,7	63 × 3,9	N 131
Разом по області		580,45 / 3,8	151	

Закінчення табл. 1

Назва вітропарку (ВЕС)	Суб'єкт господарювання	Встановлена / середня потужність, МВт	Кількість ВЕУ	Модель ВЕУ
<i>Запорізька область</i>				
Ботієвська	ТОВ «Вінд Пауер»	199,875	65 × 3,075	V 112
Приморська 1	ТОВ «Приморська ВЕС»	99,58	26 × 3,83	GE 3.8
Приморська 2	ТОВ «Приморська ВЕС 2»	99,58	26 × 3,83	GE 3.8
Орлівська	ТОВ «Орлівська ВЕС»	98,8	26 × 3,8	V 126
Запорізька	ТОВ «Юрокейп Юкрейн 1»	98,01	27 × 3,63	GE 3.6
Разом по області		595,845 / 3,5	170	
<i>Одеська область</i>				
Овід Вінд	Güriş İnşaat ve Mühendislik A.Ş	32,67	9 × 3,63	GE 3.6
Южне Енерджі	ТОВ «Южне Енерджі»	76,5	17 × 4,5	ND 4,5
Дністровська (1 черга)	ТОВ «Елементум Енерджі»	40,0	10 × 4,0	GE 4.0
Разом по області		149,17 / 4,1	36	
<i>Львівська область</i>				
Старий Самбір 1	ТОВ «Еко- Оптіма»	13,2	4 × 3,3	V 112
Старий Самбір 2	ТОВ «Карпатський вітер»	20,7	6 × 3,45	V 136
Разом по області		33,9 / 3,9	10	
<i>Тернопільська область</i>				
Біоенергопродукт	ТОВ «Біоенергопродукт»	4,0	2 × 2,0	E 70
Разом по області		4,0 / 2,0	2	
Разом по Україні		1510,865 / 3,61	418	

Сукупний діапазон потужностей для ММ (1), (2) охоплює увесь модельний ряд ВЕУ, що експлуатуються у промислових вітропарках України, а проведені зіставлення результатів теоретичних досліджень та промислової експлуатації переконливо довело правомірність та надійність застосування цих ММ [14, 15].

Визначення вартості ВЕУ за-даного типорозміру. Запропоновані оригінальні лінійні ММ, отримані за результатами досліджень еволюції основних параметрів ВЕУ та усередненої (загальносвітової) вартості (УВ) одного мегавату їх потужності, дозволяють визначати вартість ВЕУ на будь-який рік дослідження (експлуатації). Згідно [16] УВ одного мегавату потужності ВЕУ протягом 2010—2017 рр. безупинно знижувалась:

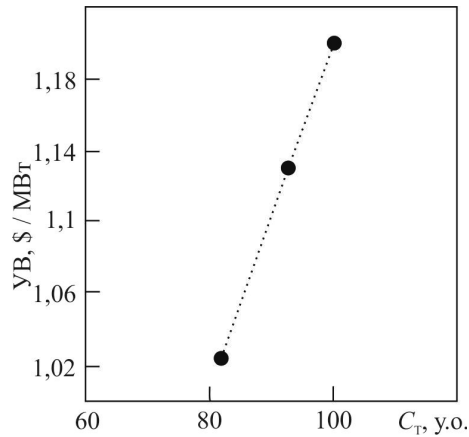


Рис. 1. Усереднена вартість за 2015—2017 рр.

Рік	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
УВ, \$ млн./МВт	1,515	1,350	1,300	1,235	1,265	1,200	1,130	1,025

За оновленими даними [17] тенденції швидкого зниження витрат на будівництво ВЕУ, які спостерігалися протягом останнього десятиліття, у 2021 р. змінилися на протилежні: ціни на ВЕУ зросли на 9 %. Динаміка цін на ВЕУ протягом 2015—2021 рр. була такою:

Рік	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Вартість ВЕУ C_t , у.о.	100	93	82	78	77	79	86

Оцінити ступінь узгодженості цін за 2015—2017 рр. дозволяє рис. 1, із якого витікає рівняння

$$УВ = 0,0097 C_t + 0,2286 \quad (3)$$

з високим коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9998$. За даними вартості ВЕУ в 2015—2021 рр. та рівняння (3) УВ у 2021 р. склала 1,0628 \$/МВт.

Усереднена вартість формується згідно вартісних показників найбільш розповсюджених на обраний рік ВЕУ, які можна подати у вигляді ВЕУ із середньорічними усередненими параметрами. Але ці параметри із року в рік зростають, що зумовлює потребу звертання до статистики історичної еволюції розмірів ВЕУ. Середньорічні значення параметрів наземних ВЕУ у 2010—2018 рр. у 28-ми країнах Європи (зона EU28) змінювалися відповідно до табл. 2 [18].

Таблиця 2. Еволюція параметрів ВЕУ у 2010—2018 рр. (EU28)

Рік	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
P , МВт	2,0	2,0	2,2	2,3	2,4	2,1	2,3	2,7	2,8
D , м	83	83	88	90	95	89	92	104	108

За відсутністю більш свіжих даних визначимо наступні тренди перспективного розвитку параметрів БЕУ за чотири роки стабільного зростання (2015—2018 рр.):

$$P = 0,25 \cdot \text{рік} - 501,65 \quad (R^2 = 0,95), \quad (4)$$

$$D = 6,9 \cdot \text{рік} - 13816 \quad (R^2 = 0,94). \quad (5)$$

Згідно (4), (5) номінальна потужність БЕУ у 2021 р. склала $P_{21} = 3,6$ МВт, а діаметр ВК $D_{21} = 129$ м.

З огляду на відсутність даних щодо усередненої висоти осі ВК звернемось до результатів дослідження Javier Serrano-González [19], за яким усереднені параметри БЕУ на території Європи та Північної Америки у 2005—2012 (2014) рр. наведені у табл. 3.

Статистичний аналіз табл. 3 свідчить про наявність істотного кореляційного зв'язку між параметрами D та H ($R = 0,96$), що дало можливість скласти наступне рівняння лінійної регресії:

$$H = 0,9266 \cdot D + 7,8807 \quad (R^2 = 0,92). \quad (6)$$

Підставивши (5) в (6), отримаємо

$$H = 6,3935 \cdot \text{рік} - 12794. \quad (7)$$

Несуттєва різниця даних у табл. 2 та 3 за 2010—2014 рр. доводить узгодженість результатів, описаних у роботах [18] та [19], тобто рівняння (6) є справедливим і для даних табл. 2. Підставляючи у (6) значення $D_{21} = 129$ м, отримаємо усереднену висоту ВК у 2021 р.: $H_{21} = 127$ м.

Запропонована у роботі [4] ММ дозволяє за даними усереднених значень параметрів БЕУ та УВ на рік дослідження Y визначити вартість БЕУ C_i із заданими параметрами (P, D, H):

$$C_{\tau} = k \text{ УВ } P, \\ k = 0,08379 - 0,27505 (P - P_Y) + 0,01542 (D - D_Y) + 0,00414 (H - H_Y).$$

Таблиця 3. Еволюція параметрів БЕУ 2005—2012 (2014) рр.

Рік	P , МВт	D , м	H , м
2005	1,5	72	72
2006	1,6	74	78
2007	1,7	77	82
2008	1,8	78	79
2009	1,9	81	83
2010	1,9	83	85
2011	2,1	86	87
2012	2,1	90	91
2013	2,2	91	
2014	2,3	96	

Таблиця 4. Динаміка ТЕП еталонних ВЕУ США за звітами NREL за 2015—2020 рр.

Показник	2015	2017	2018	2019	2020
P , МВт	2,00	2,32	2,40	2,60	2,80
D , м	102,0	113	115,6	121,2	125
H , м	82,1	86	88,1	90,1	90
C_T , \$ млн	2,418	2,538	2,426	2,577	2,859
КВ, \$ млн	3,380	3,735	3,528	3,734	4,094
ЕВ, \$/кВт	51	44	44	43	43
ФС, %	9,6	7,9	7,5	6,5	5,8
Q , МВт · год	6 988	8 428	8 755	9 708	10 368
C_{EE} , \$/МВт · год	61	47	42	37	34

Застосовуючи цю модель, перейдемо до оцінки вартісних показників вітропарків України.

Зіставлення результатів математичного моделювання із вартісними показниками вітропарків США. Достовірність та допустимість прийнятих ідеалізацій при розробці будь-якої моделі реальної системи може бути перевірена та оцінена лише через зіставлення результатів теоретичних досліджень з експериментальними даними. З огляду на відсутність опублікованих даних щодо вартісних показників вітропарків України звернемося до даних Національного центру вітрових технологій США (NREL), який, починаючи з 2010 р., публікує річні звіти щодо УВ ЕЕ ВЕС за результатами моделювання техніко-економічних показників еталонних ВЕУ (ВЕС), які уособлюють усереднені значення параметрів найбільш поширених на визначений рік ВЕУ США.

В табл. 4 наведено динаміку усереднених техніко-економічних показників (ТЕП) еталонних ВЕУ США за 2015—2020 рр. (окрім 2016 р.) [9—13].

Визначимо вартісні показники еталонної ВЕУ за 2020 р.:

загальносвітові — $P_{20} = 3,35$ МВт; $D_{20} = 122,0$ м; $H_{19} = 120,9$ м; $УВ_{20} = 0,995$ \$ млн/МВт;

усереднені показники вітропарків США (див. табл. 4) — $P = 2,8$ МВт; $D = 125$ м; $H = 90$ м; $ФС = 0,058$; $Q = 10368$ МВт · год; $ЕВ = 43$ \$/кВт.

Розрахунок:

$$k = 1 - 0,27505 (2,80 - 3,35) + 0,01542 (125 - 122,0) + 0,00414 (90 - 120,9) = 1,070;$$

$$C_T = 2,8 \cdot 0,995 \cdot 1,070 = 2,981 \text{ $млн}; \text{ КВ} = 2,981 / 0,75 = 3,975 \text{ $млн};$$

$$C_{EE} = \frac{(0,058 \cdot 3,975 \cdot 10^6) + (43 \cdot 2,8 \cdot 10^3)}{10368} = 34 \text{ $/МВт} \cdot \text{год}.$$

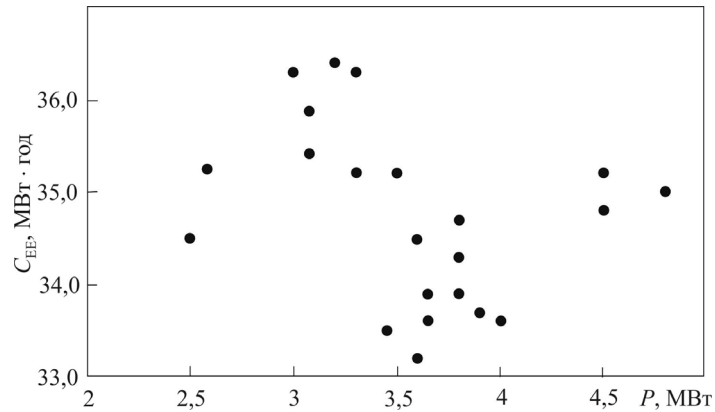


Рис. 2. Залежність вартості електроенергії від номінальної потужності ВЕУ вітропарків України

Аналогічно визначимо вартісні показники за інші роки. У табл. 5 подано результати зіставлення даних NREL із результатами математичного моделювання за показниками КВ та C_{EE} у вигляді їх відносних відхилень Δ (значення показників ЕВ та ФС взяті з табл. 4)

Як видно з табл. 5, за виключенням 2015 р., розроблені ММ забезпечили високу точність прогнозування вартісних показників вітропарків США, що дає підстави вважати обґрунтованою наступну оцінку вартісних показників вітропарків України.

Визначення вартісних показників вітропарків України у 2021 р. На кінець 2021 р. сукупна ВП ВЕУ вітропарків України досягла 1672,9 МВт [2] та продовжує зростати. З цих вітропарків за «зеленим» тарифом з передачею ЕЕ в ОЕС України працюють 25 вітропарків (ВЕС) загальною потужністю 1510,865 МВт, в які входять 418 мультимегаватних ВЕУ потужністю від 2,0 МВт до 4,8 МВт (середня потужність 3,6 МВт). Водночас, відставання економіки та соціального рівня населення країни зумовило прийняття закону [20], за яким відбулося зниження зеленого тарифу

Таблиця 5. Розрахункові та фактичні вартісні показники

Рік	КВ, \$ млн		Δ КВ, %	C_{EE} , \$/МВт·год		ΔC_{EE} , %
	NREL	ММ		NREL	ММ	
2015	3,380	3,909	-15,7	61	68	-11,5
2017	3,735	3,777	-1,1	47	48	-2,1
2018	3,528	3,642	-3,2	42	43	-2,4
2019	3,734	3,824	-2,4	37	37	0,0
2020	4,094	3,975	2,9	34	34	0,0

для ВЕС на 7,5%, а також розпочато перехід до гнучкого ціноутворення. Ці зміни підтверджують своєчасність та актуальність проведення досліджень щодо оцінки стану розвитку вітроенергетики в Україні з урахуванням особливостей економіки та потреб споживачів [21].

У табл. 6 наведено вартісні показники ВЕУ мультимегаватного класу, які експлуатуються у вітропарках України. Обсяг річного виробітку для ВЕУ потужністю 2,5—3,3 МВт було обчислено за формулою (1), інші — за формулою (2). Відповідно до [9—13] загальноприйняті в практиці втрати виробітку електроенергії оцінюються у 15%.

За даними табл. 6 побудовано графік залежності вартості C_{EE} від номінальної ВП ВЕУ P для вітрокліматичних умов Північного Причорномор'я станом на 2021 р. (рис. 2). Із рис. 2 видно, що найнижчі показники C_{EE} досягаються при експлуатації ВЕУ потужністю 3,5—4 МВт. При цьому в залежності від обраних значень діаметру та висоти осі ВК вартість знижується до 33 \$/МВт·год (GE 3.6), або, навпаки, перевищує 35 \$/МВт·год (WTU 3.5).

Таблиця 6. Показники ВЕУ українських вітропарків у 2021 р.

ВЕУ	P	D	H	Q , МВт·год	C_{EE} , \$/МВт·год
FL 2500—100	2,5	100	100	7 547	34,5
WTU 3.0	3,0	120	100	9 778	36,3
V 112	3,075	112	94	9 054	35,4
V 112	3,075	112	119	9 666	35,9
WTU 3.2	3,2	120	100	10 008	36,4
V 112	3,3	112	94	9 312	35,2
WTU 3.3	3,3	120	100	10 122	36,3
V 126	3,45	126	117	12 498	33,5
WTU 3.5	3,5	138	100	12 892	35,2
GE 3.6	3,6	137	110	13 499	34,5
GE 3.6	3,6	137	131	14 803	33,2
V 126	3,65	126	117	12 701	33,6
V 136	3,65	136	120	14 054	33,9
V 126	3,8	126	112	12 543	33,9
GE 3.8	3,8	130	110	12 886	34,3
GE 3.8	3,8	137	110	13 702	34,7
N 131	3,9	131	120	13 725	33,7
GE 4.0	4,0	137	131	15 210	33,6
ND 4000	4,5	149	125	16 434	34,8
WTU 4.5	4,5	151	120	16 667	35,2
WTU 4.8	4,8	151	120	16 972	35,0

Однак слід зазначити достатньо невисоку вартість виробленої ЕЕ C_{EE} ВЕУ FL 2500—100, тобто експлуатація ВЕУ відносно малої потужності у вітрокліматичних умовах України не втрачає актуальності. Тому цілком зрозумілим став запуск в експлуатацію компанією «Сінга Енерджі» у 2019 р. ВЕУ Vestas потужністю 2 МВт. Відомо, що висота осі ВК цих встановлених ВЕУ складає 80 м, але, на жаль, не вдалося знайти даних відносно фактичного діаметру ВК, що пояснює відсутність цієї ВЕУ у табл. 6. Разом з тим, результати проведених розрахунків для ВЕУ Vestas V 80, V 90, V 100 та V 110 довели можливість генерування ЕЕ вартістю від 33,2 \$/МВт · год (для V 110) до 34,5 \$/МВт · год (для V 80).

За результатами проведеного дослідження усереднене значення C_{EE} для ВЕУ, наведених в табл. 6, у 2021 р. склало 34,7 \$/МВт · год, що трохи вище усередненого значення C_{EE} вітропарків США 2018—2020 рр. (33—34 \$/МВт · год) [22]. Разом з тим, за звітами NREL [9—13] та за результатами проведених розрахунків річний виробіток ВЕУ у вітрокліматичних умовах вітропарків США на 4—7 % вищий порівняно з умовами Північного Причорномор'я України, чим пояснюється відповідне зниження вартості C_{EE} . Проте загалом вітроенергетичний сектор України має відносно високі результати порівняно із середньосвітовою вартістю генерування наземних ВЕУ на рівні 39 \$/МВт · год (2020 р.) [23].

Слід зазначити, що вартість ЕЕ ВЕУ потужністю понад 4,5 МВт все ще досить висока, і це змушує замислитися над доцільністю вибору ВЕУ в межах середньосвітових показників еволюції її параметрів.

Висновки

1. Побудовані ММ вартості ВЕУ та вартості ЕЕ, що ними виробляється, дозволили вперше зробити оцінку вартісних показників вітропарків України.
2. В залежності від обраного типорозміру ВЕУ різниця у вартості ЕЕ, що виробляється, сягає 10 %, тому вкрай важливо проводити ретельний вибір ВЕУ для конкретної місцевості.
3. Найменші показники вартості ЕЕ, що виробляється в Україні, мають ВЕУ потужністю 3,5—4,0 МВт, що практично співпадає з середньосвітовим показником вартості.
4. Вартість ЕЕ, що виробляється ВЕУ потужністю понад 4,5 МВт, виявилася приблизно 35 \$/МВт · год, що ставить під сумнів доцільність вибору ВЕУ такої потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Любас Д. Ветроэнергетика Украины: потенциал и перспективы развития. // Электрик, 2013, №7-8, с. 24—27. Режим доступа: http://www.electrician.com.ua/files/EL_07-13s_p_24-27.pdf.
2. ГС «Українська вітроенергетична асоціація» Вітроенергетичний сектор України 2021. Огляд ринку за рік до війни, 2022, 102 с. Режим доступу: http://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2021_ua_web_2.pdf
3. Saint-Drenan Y.-M., Besseau R., Jansen M. et al. A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions // Renewable Energy, 2020, Vol. 157, pp. 754—768. Doi: 10.1016/j.renene.2020.04.123.
4. Podhurenko V., Kutsan Yu., Getmanets O., Terekhov V. (2021) Modelling of cost indicators for wind turbines of multimewatt class in various sizes // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021, Vol. 915, стаття № 012021, p. 1—8. Doi:10.1088/1755-1315/915/1/012021
5. Helgason K. Selecting optimum location and type of wind turbines in Iceland, 2012. Режим доступу: <https://skemman.is/bitstream/1946/12679/1/MScKristbjornHelgason.pdf>
6. Yang, Han & Chen, Jin & Pang, Xiaoping. Wind Turbine Optimization for Minimum Cost of Energy in Low Wind Speed Areas Considering Blade Length and Hub Height // Applied Sciences, 2018, 8. 1202. Doi: 10.3390/app8071202.
7. IRENA. Renewable energy technologies: cost analysis series. 2012, Vol. 1: Power Sector. Issue 5/5 64 p.
8. Bolinger M. and Wiser R. Wind Power Price Trends in the United States. Preprint of article published in Modern Energy Review. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009. Режим доступу: <https://www.osti.gov/servlets/purl/974157>
9. Moné C., Hand M., Bolinger M. et al 2015 Cost of Wind Energy Review (Technical Report). NREL/TP-6A20-66861. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (US). 2017, 91 p. Режим доступу: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/66861.pdf>.
10. Stehly T., Beiter Ph., Heimiller D. and Scott G. 2017 Cost of Wind Energy Review. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-72167. 2018, 46 p. Режим доступу: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/72167>.
11. Tyler S., Beiter Ph. 2018 Cost of Wind Energy Review. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-74598. 2020, 71 p. Режим доступу: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74598.pdf>.
12. Tyler S., Beiter Ph., Duffy P. 2019 Cost of Wind Energy Review. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-78471. 2020, 86 p. Режим доступу: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78471.pdf>.
13. Tyler S., Duffy P. 2020 Cost of Wind Energy Review. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-81209. 2022, 77 p. Режим доступу: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81209.pdf>.
14. Подгуренко В.С., Гетманец О.М., Терехов В.Е. Математическая модель задачи эффективности и один из методов её решения для увеличения выработки электроэнергии ветроэлектростанциями // Моделирование та інформаційні технології. Зб. наук праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова, 2019, вип. 866 с. 50—55.
15. Подгуренко В.С., Терехов В.Е. О качественной оценке ветроиспользования в ветроклиматических условиях Северного Причерноморья Украины // Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: Матеріали ХХІІ Міжнародної науково-практичної конференції, 19—20 травня 2022 р. Київ : Інтерсервіс, 2022, с. 192—194.
16. Bloomberg NEF 2H 2017 Wind Turbine Price Index, 2018. Режим доступу: <https://about.bnef.com/blog/2h-2017-wind-turbine-price-index/>

17. IEA Critical minerals threaten a decades-long trend of cost declines for clean energy technologies, IEA, Paris, 2022. Режим доступу: <https://www.iea.org/commentaries/critical-minerals-threaten-a-decades-long-trend-of-cost-declines-for-clean-energy-technologies>
18. Telsnig T. Wind Energy Technology Development Report 2020. 10.2760/742137. 2021, 114 p.
19. Serrano-González, J., and Lacal-Arántegui, R. Technological evolution of onshore wind turbines – a market-based analysis // *Wind Energ.*, 2016 19: pp. 2171—2187. Doi:10.1002/we.1974.
20. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення умов підтримки виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії». Відомості Верховної Ради, 2020, № 50, ст.456. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/810-20#Text>
21. Podhurenko V., Kovshova I., Terekhov V., Dubovyk N. Evaluation of efficiency of wind power plants operation in wind conditions of the Northern Black Sea region of Ukraine. // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 628 (2021), стаття № 012007, pp. 1—8. Doi:10.1088/1755-1315/628/1/012007.
22. U.S. Department of Energy. Office of Scientific and Technical Information Land-Based Wind Market Report: 2021 Edition. DOE/GO-102021-5611. 2021, 87 p.
23. IRENA. Режим доступу: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Global-Trends> (перевірено 25.07.2022 p.)

Отримано 01.08.22

REFERENCES

1. Lyubas, D. (2013). “Wind energy of Ukraine: potential and development prospects”, *Energetic*, Vol. 7-8, pp. 24-27, available at: http://www.electrician.com.ua/files/EL_07-13s_p24-27.pdf.
2. PA “Ukrainian Wind Energy Association” (2022), *Vitroenerhetychnyi sektor Ukrainy 2021. Ohliad rynku za rik do viiny* [Wind energy sector of Ukraine 2021. Market review a year before the war], available at: http://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2021_ua_web_2.pdf.
3. Saint-Drenan, Y.-M., Besseau, R., Jansen, M., Staffell, I., Troccoli, A., Dubus, L., Schmidt, J., Gruber, K., Simões, S. and Heier, S. (2020), “A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions”, *Renewable Energy*, Vol. 157, pp.754-768, DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.123.
4. Podhurenko, V., Kutsan, Yu., Getmanets, O. and Terekhov, V. (2021), “Modelling of cost indicators for wind turbines of multimegawatt class in various sizes”, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 915, no. 012021, pp. 1-8, DOI:10.1088/1755-1315/915/1/012021.
5. Helgason, K. (2012), *Selecting optimum location and type of wind turbines in Iceland*, available at: <https://skemman.is/bitstream/1946/12679/1/MScKristbjornHelgason.pdf>
6. Yang, H., Chen, J. and Pang, X. (2018), “Wind Turbine Optimization for Minimum Cost of Energy in Low Wind Speed Areas Considering Blade Length and Hub Height”, *Applied Sciences*, Vol. 8, no. 1202, DOI: 10.3390/app8071202.
7. IRENA (2012), *Renewable energy technologies: cost analysis series. Volume 1: Power Sector. Issue 5/5*.
8. Bolinger M. and Wiser R. Wind Power Price Trends in the United States. Preprint of article published in *Modern Energy Review*. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009. available at: <https://www.osti.gov/servlets/purl/974157>.
9. Moné, C., Hand, M., Bolinger, M., Rand, J., Heimiller, D. and Ho, J. (2017), 2015 Cost of Wind Energy Review (Technical Report). NREL/TP-6A20-66861. National Renewable

- Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (US), available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/66861.pdf>.
10. Stehly, T., Beiter, Ph., Heimiller, D. and Scott, G. (2018). 2017 Cost of Wind Energy Review. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/72167>.
 11. Tyler, S. and Beiter, Ph. (2020), 2018 Cost of Wind Energy Review. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74598.pdf>.
 12. Tyler, S., Beiter, Ph. and Duffy, P. (2020), 2019 Cost of Wind Energy Review. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78471.pdf>.
 13. Tyler, S. and Duffy, P. (2022), 2020 Cost of Wind Energy Review. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81209.pdf>.
 14. Podhurenko, V., Getmanets, O. and Terekhov, V. (2019), "Mathematical model of the efficiency problem and one of the methods of its solution for increasing the production of electricity by wind power stations", *Modeliuvannia ta informatsiini tekhnologii*, Vol. 86, pp. 50-55.
 15. Podhurenko, V. and Terekhov, V. (2022), "About the qualitative assessment of wind use in the wind-climatic conditions of the Northern Black Sea Region of Ukraine", *Vidnovliuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist u XXI stolitti: Materialy XXII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* [Renewable Energy and Energy Efficiency of the XXIst century: Proceedings of XXIIth international scientific and practical online – conference], Kyiv, Ukraine, May 19-20, 2022, pp. 192-194.
 16. Bloomberg NEF 2H 2017 Wind Turbine Price Index (2018), available at: <https://about.bnef.com/blog/2h-2017-wind-turbine-price-index/>.
 17. IEA (2022), Critical minerals threaten a decades-long trend of cost declines for clean energy technologies, Paris, France, available at: <https://www.iea.org/commentaries/critical-minerals-threaten-a-decades-long-trend-of-cost-declines-for-clean-energy-technologies>.
 18. Telsnig, T. (2021), Wind Energy Technology Development Report 2020, DOI: 10.2760/742137.
 19. Serrano-González, J. and Lacal-Arántegui, R. (2016), "Technological evolution of onshore wind turbines – a market-based analysis", *Wind Energy*, Vol. 19, pp. 2171-2187, DOI: 10.1002/we.1974.
 20. The Law of Ukraine "On the introduction of amendments to some laws of Ukraine regarding the improvement of the conditions for supporting the production of electricity from alternative energy sources". Vidomosti Verkhovnoi Rady, 2020, No 50, p. 456. available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/810-20#Text>.
 21. U.S. Department of Energy. Office of Scientific and Technical Information (2021), Land-Based Wind Market Report: 2021 Edition. DOE/GO-102021-5611.
 22. IRENA, available at: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Global-Trends> (accessed July 25, 2022).

Received 01.08.22

V.S. Podgurenko, Yu. G. Kutsan, O.M. Getmanets, V.E. Terekhov

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS
OF THE INVESTMENT POLICY IN THE WIND ENERGY SECTOR
OF UKRAINE IN THE CONTEXT OF GLOBAL TRENDS

The lack of information about the real results of the wind farms industrial operation in Ukraine, the existing tendency to hide the main technical characteristics of installed multi-megawatt wind turbines and their cost, creates insurmountable difficulties in evaluating their

operation results. Based on studies of the evolution of the main parameters of wind turbines and the average (worldwide) cost of 1 MW of their rated power, original linear mathematical models are proposed for the first time, which allow determining the cost of wind turbines with given main parameters (rated power, diameter of the rotor and hub height) for any year of the study. With the use of previously developed and tested mathematical models of the annual electricity production of wind turbines of various power series in the wind and climate conditions of the Northern Black Sea region, the cost indicators of wind farms of Ukraine for 2021 were determined and their comparison with the indicators of the world's leading countries in wind energy was done.

Keywords: annual energy production, cost, size.

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

КУЦАН Юлій Григорович, докт. техн. наук, старший дослідник Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 1966 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — енергетика.

ГЕТЬМАНЕЦЬ 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 «УК «Вітряні парки України». У 2010 р. закінчив Національний університет кораблебудування (м. Миколаїв). Область наукових досліджень — вітроенергетика.