

**Михайленко О.Ю.**

Криворізький національний університет

**Карабут Н.О.**

Криворізький національний університет

**Мельник О.Є.**

Криворізький національний університет

**Кузьменко А.С.**

Криворізький національний університет

**Коломіц Г.В.**

Криворізький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НИЗЬКОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МІСТ

*Стаття присвячена питанню оцінки ефективності інтеграції локальної вітроелектростанції з вітроенергетичними установками низької потужності у структуру електричних мереж міста на прикладі Індустріального мікрорайону м. Кривого Рогу. Для проведення порівняльного аналізу розглядалося оснащення вітроелектростанції вітрогенераторами українського виробництва та виробництва КНР з однаковою номінальною потужністю. Агрегати в межах прилеглої до житлового масиву території розміщувалися за двома конфігураціями: рівномірною та шаховою. При визначенні очікуваного рівня виробництва електроенергії використовувалися статистичні моделі вітрових умов місцевості. Результати дослідження дали змогу встановити, що застосування вітчизняних вітроенергетичних установок, за умови їх рівномірного розташування, вимагає найбільших капіталовкладень та витрат на обслуговування обладнання, проте забезпечує покриття практично 9% потреб споживачів мікрорайону в електроенергії завдяки найвищому середньорічному обсягу генерації.*

*Незалежно від типу установки, шахова конфігурація забезпечує менші обсяги генерації електроенергії через можливість встановлення меншої кількості агрегатів порівняно з рівномірним розташуванням. При цьому загальна вартість обладнання та витрати на його обслуговування також значно нижчі. Наведені річні витрати на 1 кВт та собівартість виробництва електроенергії для двох порівнюваних варіантів конфігурації практично не відрізняються.*

*Застосування вітроенергетичних установок виробництва КНР продемонструвало найменшу собівартість виробництва однієї кВт·год, нижчі витрати на зведення та експлуатацію електростанції, проте рівень забезпечення споживачів мікрорайону електроенергією не перевищує 5,3%.*

*Разом із тим проведений аналіз показав, що собівартість виробництва електроенергії перевищує чинний «зелений» тариф, тому впровадження локальної вітроелектростанції спрямоване здебільшого на покращення екологічних та соціальних аспектів життя населення.*

*Рентабельність локальної вітроелектростанції може бути забезпечена у разі застосування більш дешевого обладнання, яке при цьому забезпечує вищі обсяги генерації електроенергії, що призведе до зниження собівартості її виробництва.*

**Ключові слова:** *відновлювана енергетика, вітроенергетичні установки низької потужності, вітроелектростанція, система електропостачання міста, виробництво електроенергії, ефективність, собівартість.*

**Постановка проблеми.** Нині серед нетрадиційних методів виробництва електроенергії, що використовують відновлювані енергоресурси, найбільше поширення отримали геліо- та вітроенергетичні методи. При цьому в умовах міст і

селищ, перевага надається геліоенергетичним установкам. Це зумовлюється, насамперед, невеликою вартістю окремих фотоелектричних перетворювачів, можливістю їх розташування безпосередньо в межах будівель та придомових

територій, що виключає необхідність передачі електроенергії на значні відстані. Разом із тим такі системи не позбавлені недоліків: їхня ефективність суттєво знижується при значній захмареності, у темний час доби та при високому рівні запиленості, що характерна для великих міст. У результаті середньорічне вироблення електроенергії знаходиться на низькому рівні й не забезпечує потреби побутових споживачів.

Альтернативою для геліоенергетики є застосування вітроенергетичних установок (ВЕУ). Проте через особливості їх конструкції та умов експлуатації вони практично не застосовуються у межах території міст. Так, для забезпечення номінального режиму роботи ВЕУ номінальною потужністю 2 МВт необхідна швидкість вітру становить 14 м/с, що в умовах міста є аномальним значенням через наявність значної кількості перешкод у вигляді багатоповерхових будинків. Додатковим обмеженням виступає необхідність дотримання вимог безпеки. Враховуючи, що ВЕУ містять обертові частини значної площі та мають високу вагу, їх необхідно розташовувати на відстані від будівель та споруд у десять разів більшій, ніж висота щогли, на якій розміщений вітрогенератор, котра, своєю чергою, становить від 100 до 160 м. Також небезпечним для здоров'я населення є високий рівень ультразвуку, що генерують агрегати. Таким чином, ВЕУ великої потужності доцільно встановлювати на відкритій місцевості, що достатньо віддалена від міста. У результаті виникає необхідність передачі електроенергії на значну відстань, яка завжди супроводжується втратами.

Виключити вищезазначені недоліки дає змогу застосування ВЕУ низької потужності до 20 кВт, висотою щогли до 20 м та з номінальною швидкістю вітру до 10 м/с. Зазначені параметри дають змогу розташовувати вітрогенератори на територіях значної площі в безпосередній близькості від будівель. Таких майданчиків у межах міст України достатня кількість з огляду на особливості проектів забудови жилих масивів.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Питання аналізу ефективності застосування ВЕУ низької потужності в міському середовищі розглядається у достатньо великій кількості статей [1–9]. Так, наприклад, робота [1] присвячена розміщенню таких агрегатів у м. Лондон, [2] – у південних містах Італії, [3] – на будівлі міжнародного торговельного центру в Бахрейні, [4] – у м. Джок'якарта (Індонезія).

При цьому більшість досліджень [3–9] орієнтована на визначення особливостей виробництва

електроенергії під час встановлення обмеженої кількості ВЕУ безпосередньо на дахах і стінах багатоповерхових будинків. Це зумовлюється тим, що сучасні міста характеризуються щільним характером забудови і, як наслідок, відсутністю територій придатних до встановлення великої кількості ВЕУ. У результаті рівень генерації електроенергії через низьку кількість агрегатів у таких системах залишається доволі низьким. Форма будівлі, особливо її даху, впливає на аеродинамічні характеристики [7; 8], а взаємне розташування будівель – на вітрові умови [6]. Окремо в роботі [3] автори зазначають, що конструкція будівлі має витримувати додаткові механічні навантаження, котрі виникають під час роботи ВЕУ. Тому необхідно посилювати конструкцію наявних будинків або враховувати ці навантаження під час проектування та зведення нових. Це призводить до значних капіталовкладень за відсутності перспективи повернення коштів шляхом продажу виробленої електроенергії.

Таким чином, концепцію розміщення ВЕУ на будинках доцільно реалізовувати у процесі побудови нових житлових масивів, враховуючи усі розглянуті особливості.

Зазначимо, що в наведених роботах [1–9] не визначається рівень забезпечення споживачів будівель електроенергією, а лише приводяться очікувані обсяги генерації.

В умовах України перевагу надають розміщенню ВЕУ потужністю від 1 МВт у південних областях, зокрема, Херсонській, Одеській та Запорізькій. У результаті вдосконаленню систем електропостачання міст шляхом інтеграції локальних вітроелектростанцій (ЛВЕС), на яких встановлюють агрегати потужністю до 20 кВт, приділяється мало уваги, що зумовлює актуальність роботи.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає в дослідженні ефективності інтеграції локальних вітроелектростанцій із вітроенергетичними установками низької потужності в електричну мережу міст на прикладі мікрорайону Індустріальний м. Кривого Рогу.

Досягнення мети роботи вимагає вирішення таких завдань:

- розрахунок очікуваного рівня вироблення електроенергії в різних вітропотенційних зонах мікрорайону Індустріальний з огляду на отримані в роботі [10] статистичні моделі вітрових умов;
- визначення схеми розташування ВЕУ у межах території ЛВЕС;
- визначення техніко-економічних показників ефективності застосування ВЕУ низької

потужності для генерації електроенергії в умовах мікрорайону Індустріальний.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для виконання оцінки ефективності впровадження ЛВЕС із ВЕУ низької потужності необхідно вибрати енергетичні агрегати, котрі будуть використовуватись на електростанції. Доцільно розглянути застосування малих ВЕУ з максимальним значенням вихідної потужності. Порівняльний аналіз запропоновано здійснювати для двох ВЕУ потужністю 20 кВт марки FLAMINGO AERO WES-20 українського виробництва та MG-H20KW виробництва КНР. Технічні характеристики агрегатів наведено у табл. 1.

Аналіз характеристик показує, що вітрогенератор WES-20 має більший на 3 м діаметр вітроколеса та меншу на 1 м/с швидкість вітру, при якій агрегат буде працювати в номінальному режимі. Проте установка MG-H20KW має більш ніж у два рази меншу вартість.

Таблиця 1

**Технічні характеристики вітроенергетичних установок низької потужності**

Тип вітрогенератора	WES-20	MG-H20KW
Потужність, кВт	20	20
Максимальна частота обертання ротора, об/хв	100	120
Діаметр вітроколеса, м	13	10
Мінімальна швидкість вітру, м/с	3	3
Номінальна швидкість вітру, м/с	8	9
Висота щогли, м	20	18
Вартість, у.о.	48 222	21 400

Попередньо визначити економічні показники використання розглянутих ВЕУ можна, виходячи з припущення, що у структурі ЛВЕС буде застосований лише один агрегат такого типу. За допомогою методики, наведеної в роботі [11], для обох варіантів розраховані приведені річні витрати на 1 кВт встановленої потужності та собівартість вироблення 1 кВт·год електроенергії. При цьому було прийнято, що витрати на зведення ЛВЕС становлять 20%, а витрати на її експлуатацію – 1% від вартості обладнання. Обслуговуючий персонал складається з двох осіб із заробітною платою 10 000 грн/міс. Результати обчислень зведені в табл. 2.

Отримані дані демонструють, що застосування WES-20 забезпечує більші на 37,9% і 38,1% відповідно наведені річні витрати на 1 кВт потужності більші та собівартість генерації порівняно з MG-H20KW. Це, насамперед, пояснюється тим, що

за однакового середньорічного рівня виробництва електроенергії визначальним параметром, за яким здійснюється розрахунок, є вартість обладнання.

Таблиця 2

**Показники ефективності роботи ВЕУ**

Тип вітроенергетичної установки	WES-20	MG-H20KW
Вартість обладнання, грн.	1237 858,74	549 338
Термін експлуатації основного обладнання, років	20	20
Середній рівень виробництва електроенергії, кВт·год/рік	60 000	60 000
Загальні капіталовкладення, грн	1 485 430,5	659 205,6
Річні експлуатаційні витрати, грн/рік	388 543,05	305 920,56
Наведені річні витрати на 1кВт потужності, грн/кВт	23 140,73	16 944,04
Собівартість вироблення електроенергії, грн/кВт·год	7,71	5,65

Зазначимо, що особливість методики, запропонованої в [11], полягає в тому, що вона не враховує конструктивні параметри ВЕУ та вітрові умови місцевості, в якій вона буде розміщуватися.

Уточнений середньорічний рівень виробництва електроенергії для певного місцерозташування ЛВЕС доцільно визначити шляхом інтегрування добутку щільності розподілу ймовірностей виникнення швидкостей вітру та функції залежності вихідної потужності ВЕУ від швидкості вітру [12]:

$$P_{cep} = \int_0^{v_{max}} P(v) \cdot PDF(v) dv, \quad (1)$$

де  $PDF(v)$  – теоретична щільність розподілу ймовірностей виникнення певних швидкостей вітру;  $P(v)$  – залежність вихідної потужності ВЕУ від швидкості вітру, котру можна визначити за виразом [13]:

$$P(v) = 0,5C_p(\lambda, \alpha) \rho S v^3, \quad (2)$$

де  $C_p(\lambda, \alpha)$  – коефіцієнт продуктивності турбіни;  $\lambda$  – відношення частоти обертання вітроколеса до швидкості вітру;  $\alpha$  – кут повороту лопатей вітроколеса;  $S$  – площа обдуву вітроколеса, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт продуктивності ВЕУ за аналітичним виразом [13]:

$$C_p(\lambda, \alpha) = C_1(C_2 - C_3\alpha - C_4\alpha^{1,5} - C_5)e^{-C_6}; \quad (3)$$

Відповідно до [13] параметри коефіцієнтів приймаємо рівними  $C_1=0,5$ ,  $C_2=116/\lambda_i$ ,  $C_3=0,4$ ,  $C_4=0$ ,  $C_5=5$  та  $C_6=21/\lambda_i$ , де:

$$\lambda_i = \frac{(\alpha^3 + 1) - 0,035(\lambda + 0,08\alpha)}{(\alpha^3 + 1)(\lambda + 0,08\alpha)}, \quad (4)$$

Змінюючи значення  $\lambda$  та  $\alpha$ , побудуємо статичну характеристику вітроустановок, наведену на рис. 1. Отриманий графік демонструє, що максимальне значення коефіцієнту продуктивності досягається при  $\alpha=0^\circ$  та  $\lambda=8,12$  і становить  $C_{pmax}=0,478$ .

Попереднє дослідження авторів [10] було присвячене отриманню адекватних статистичних моделей розподілу ймовірності виникнення швидкості вітру певного значення для майданчиків [10, с. 34, рис. 2] розташованих біля мікрорайону Індустріальний м. Кривого Рогу. Як вихідні дані використовувалися результати річних вимірювань вітрових умов. Встановлено, що найкращі показники якості апроксимації емпіричного розподілу теоретичним має двопараметричний розподіл Вейбулла при інтервалі групування швидкості вітру 0,3 м/с. Тому при подальших дослідженнях у формулі (1) для виразу складника  $PDF(v)$  доцільно застосувати зазначену статистичну модель з оптимальними коефіцієнтами, отриманими в результаті параметричної ідентифікації.

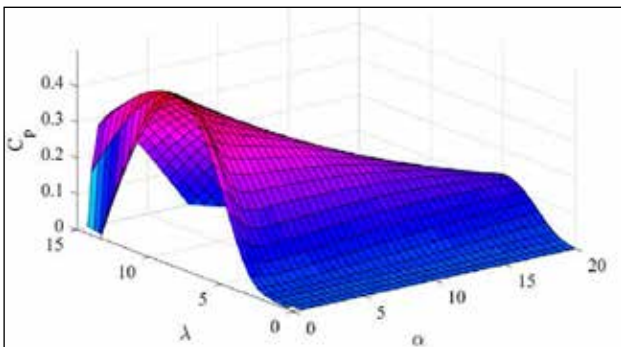


Рис. 1. Статична характеристика вітротурбіни

З використанням величини  $C_{pmax}$  та конструктивних параметрів порівнюваних ВЕУ за виразом (2) побудуємо їх криві потужностей (рис. 2).

Результати розрахунків середньорічного рівня виробництва електроенергії у вітрових умовах

мікрорайону Індустріальний із використанням виразу (1) для різних майданчиків ймовірного розміщення ЛВЕС зведені у табл. 3.

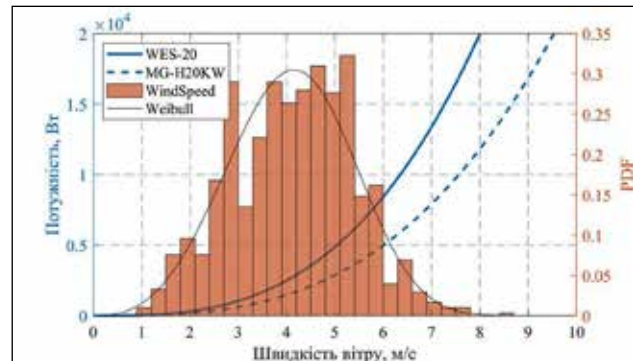


Рис. 2. Криві потужностей ВЕУ та розподіл ймовірностей виникнення певних швидкостей вітру для західного майданчика з територією сільгосп призначення

Аналіз даних показує, що найбільше середньорічне виробництво електроенергії може бути досягнуте за умови розміщення ВЕУ типу WES-20 на всій території західного майданчика, що пояснюється більш сприятливими вітровими умовами, зумовленими особливостями рельєфу та відсутністю завод. Розташування ЛВЕС, оснащеної WES-20, на частині західного майданчика, що не включає територію сільськогосподарського (с/г) призначення, призведе до зменшення обсягів генерації на 28,6%, на східному майданчику – на 20,2% та на всій прилеглий території – на 7,2%.

У разі вставлення ВЕУ типу MG-H20KW обсяги генерації знижуються на 40,8%, аніж у разі використання WES-20 у всіх чотирьох випадках територіального розміщення. Таким чином, незважаючи на вдвічі більшу вартість, ВЕУ WES-20 дає змогу виробляти більше електроенергії порівняно з аналогічною за потужністю установкою MG-H20KW.

Окремо зазначимо, що в найбільш сприятливих умовах вихідна потужність вітрогенератора

Таблиця 3

Електроенергетичні показники роботи ВЕУ у вітрових умовах мікрорайону

Територія	Вихідна потужність, кВт		Виробництво електроенергії, кВт·год/рік	
	WES-20	MG-H20KW	WES-20	MG-H20KW
Західний майданчик (без с/г)	2,454	1,452	21204,5	12547,04
Західний майданчик (із с/г)	3,435	2,033	29680,36	17562,34
Східний майданчик	2,74	1,621	23675,73	14009,31
Загальна територія	3,189	1,887	27557,82	16306,4

Показники ефективності роботи ВЕУ

Територія	Наведені річні витрати на 1кВт потужності, грн/кВт		Собівартість вироблення електроенергії, грн/кВт·год	
	WES-20	MG-H20KW	WES-20	MG-H20KW
Західний майданчик (без с/г)	188596	233389	21,83	27,01
Західний майданчик (із с/г)	134735	166690	15,59	19,3
Східний майданчик	168910,4	209056,7	19,55	24,19
Загальна територія	145128,4	179587,1	16,79	20,78

WES–20 не перевищує 3,435 кВт, а MG-H20KW – 2,033 кВт, що на 82,8% і 89,3% менше за їх номінальну потужність, відповідно. Отже, спостерігається низький рівень завантаження агрегатів.

Використавши отримані результати, виконаємо розрахунок економічних показників (див. табл. 4).

Отримані дані демонструють суттєве збільшення приведених річних витрат та собівартості виробництва електроенергії порівняно з базовими розрахунками (див. табл. 2). Так, для всього західного майданчика, де забезпечуються найбільші вихідна потужність ВЕУ та обсяги генерації, річні витрати збільшуються у 6,1 раза, а собівартість виробництва – у 2,1 раза. Це пояснюється, насамперед, низьким коефіцієнтом завантаження вітрогенератора і, як наслідок, невідповідністю середньорічного виробництва електроенергії у вітрових умовах мікрорайону, заявленому виробниками.

Використання у структурі ЛВЕС однієї ВЕУ, яке розглядалося до цього часу, призводить до нераціонального використання території її потенційного розташування. Заради підвищення ефективності ЛВЕС необхідно збільшити кількість агрегатів, що входять до її складу, без зміни або з незначним зростанням кількості обслуговуючого персоналу.

Беручи до уваги, що за результатами проведеного аналізу найбільш перспективним місцем розташування ЛВЕС біля мікрорайону Індустріальний є західний майданчик із територією с/г призначення, усі подальші дослідження проводимо для цієї площі.

Задля визначення максимальної кількості ВЕУ, котрі можуть бути розміщені у межах території ЛВЕС, необхідно врахувати вимоги безпеки, раціональну орієнтацію у просторі робочої поверхні вітротурбіни та взаємне розташування окремих агрегатів для виключення їх впливу один на одного.

Згідно з вимогами безпеки, для горизонтальних ВЕУ з обертовими частинами, відстань від будівель, місць потенційного знаходження людей (автомобільних та залізних доріг), а також повітряних і кабельних ЛЕП, газопроводів, відкритих об'єктів для транспортування води та теплової енергії має

перевищувати десятикратну висоту щогли, на якій знаходиться вітрогенератор.

Найбільш ефективним із точки зору максимального використання потенційної енергії вітру є розташування робочої поверхні ВЕУ під кутом 0–10° зустрічно до напрямку руху вітру [14]. Приймаємо кут 5°.

Для визначення орієнтації розміщення ВЕУ під час проведення вимірювань [10] додатково за допомогою цифрового флюгера здійснювалася фіксація напрямку вітру. За отриманими результатами побудована діаграма розподілу напрямку вітру за частотою виникнення (рис. 3).

З графіка видно, що рух вітру здійснюється переважно з південного сходу. Зазначимо, що найбільшого спостерігався вітер у напрямках, обмежених півднем та сходом.

У роботі [15] вказується, що для мінімізації взаємного впливу між окремими ВЕУ доцільно розташовувати їх рядами або один за одним, або в шаховому порядку. При цьому відстань між агрегатами приймаємо  $7D$ , де  $D$  – діаметр вітроколеса, а між рядами установок –  $10D$  [16]. У разі шахової конфігурації відстань між сусідніми ВЕУ та рядами агрегатів встановимо  $15D$  [15].

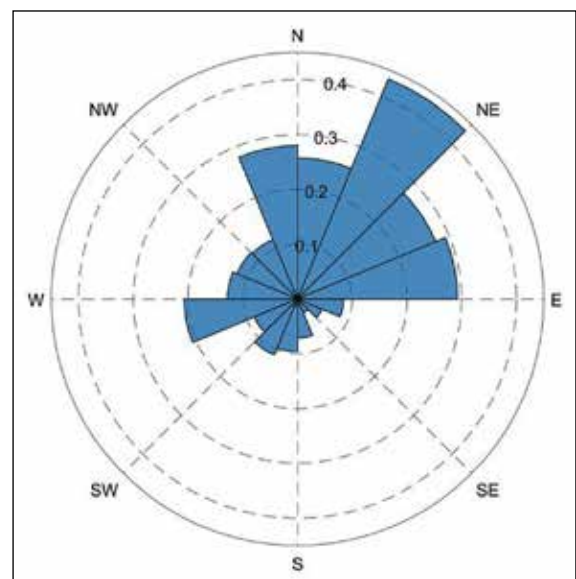


Рис. 3. Роза вітрів на території розміщення ЛВЕС

З огляду на вищевикладене, для проведення порівняльного аналізу було запропоновано розглянути дві схеми розташування ВЕУ в межах території ЛВЕС, що наведені на рис. 4. На площі розглянутого майданчика можна максимально розмістити до 123 вітрогенераторів при рівномірному розташуванні та 43 – при шаховому.

Для оцінки очікуваного рівня покриття потреб споживачів в електроенергії необхідно було визначити орієнтовне середньорічне енергоспоживання мікрорайону. Загальна кількість квартир у 20 будинках житлового масиву становить 1539. Максимальне навантаження на одну квартиру прийняте рівним 5 кВт. У результаті максимальне годинне енергоспоживання становить 7695 кВт·год. З огляду на те, що протягом доби цей показник суттєво коливається,

для визначення середньодобових показників було використано типовий графік електричних навантажень трансформаторної підстанції міської електричної мережі [17]. Щодо обчисленого максимального енергоспоживання визначені відповідні погодинні значення та нанесені на діаграму (рис. 5).

За графіком встановлено, що середнє годинне споживання потужності побутовими споживачами становить 4721,65 кВт·год, тоді середнє добове – 113319,64 кВт·год/день, середнє річне – 40795073,28 кВт·год/рік.

Визначимо середньорічний обсяг виробництва електроенергії, рівень забезпечення споживачів мікрорайону електроенергією та відповідні економічні показники для запропонованих варіантів конфігурації вітроелектростанції. Результати розрахунків зведені в табл. 5.

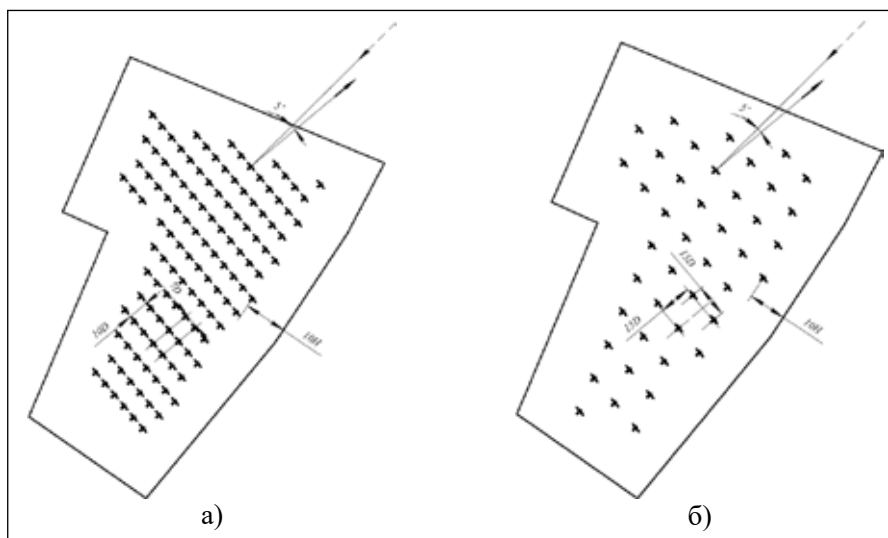


Рис. 4. Схеми розташування вітроенергетичних установок на території ЛВЕС

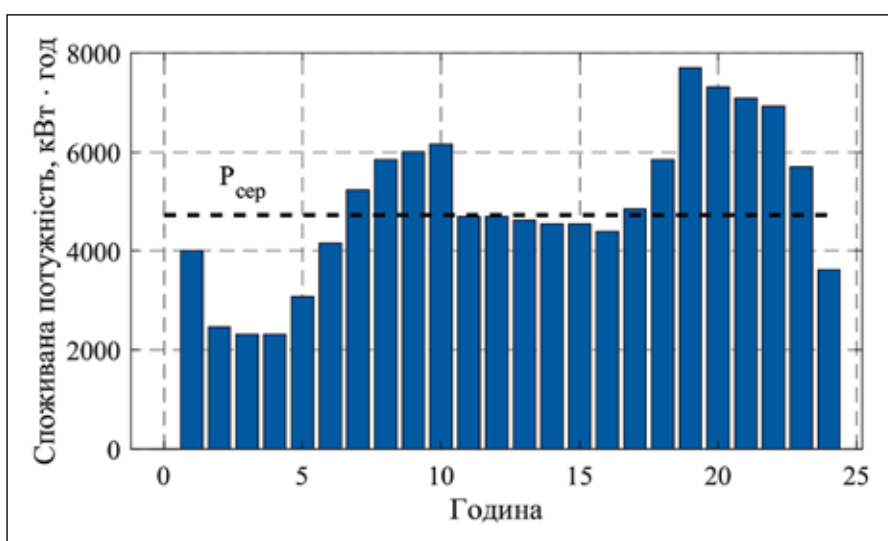


Рис. 5. Графік електричних навантажень мікрорайону



## Показники ефективності роботи ЛВЕС

Показник	Тип ВЕУ	Схема розташування та кількість ВЕУ	
		Рівномірна, 123 ВЕУ	Шахова, 43 ВЕУ
Загальні капіталовкладення, млн грн	WES-20	182,708	63,874
	MG-H20KW	81,082	28,346
Річні експлуатаційні витрати, млн грн/рік	WES-20	18,511	6,627
	MG-H20KW	8,348	3,075
Загальна середня вихідна потужність електростанції, кВт	WES-20	422,51	147,7
	MG-H20KW	250,06	87,4
Загальне середньорічне вироблення електроенергії електростанцією, кВт·год/рік	WES-20	3650684,28	1276255,48
	MG-H20KW	2160167,82	755180,62
Рівень забезпечення споживачів мікрорайону електроенергією, %	WES-20	8,95	3,13
	MG-H20KW	5,3	1,85
Наведені річні витрати на 1кВт потужності, грн/кВт	WES-20	65434	66490,82
	MG-H20KW	49597,67	51383,29
Собівартість вироблення електроенергії, грн/кВт·год	WES-20	7,57	7,69
	MG-H20KW	5,74	5,95

Отримані дані демонструють, що у разі рівномірної схеми розміщення вітрогенераторів типу WES-20 необхідні у 2,86 рази вищі загальні капіталовкладення, ніж у разі шахової. Таке співвідношення за цим показником зберігається й за умови використання установок типу MG-H20KW. При цьому комплектація ЛВЕС агрегатами виробництва КНР вимагає на 55,6% нижчих капіталовкладень порівняно із застосуванням вітчизняних ВЕУ за обома варіантами конфігурації. Також висока кількість ВЕУ, яку можна розмістити за рівномірною схемою, вимагає очікувано більших річних експлуатаційних витрат, ніж шаховий варіант: для установок типу WES-20 вищих у 2,79 рази, для MG-H20KW – у 2,71 рази. При цьому витрати на обслуговування MG-H20KW менші на 54,9% для рівномірного розміщення і на 53,6% – для шахового, порівняно з WES-20.

Разом із тим через особливості конструктивного виконання оснащення ЛВЕС установками WES-20 дає змогу забезпечити вищу вихідну потужність агрегатів та середньорічний рівень виробництва електроенергії електростанцією, ніж у разі використання більш дешевої ВЕУ. Так, за умови рівномірного розміщення WES-20, порівняно з MG-H20KW, вихідна потужність і середньорічний обсяг генерації у 1,69 рази вищі. Для шахової конфігурації таке співвідношення зберігається. При цьому останній варіант схеми розташування ВЕУ забезпечує на 65,04% менше середньорічне виробництво електричної енергії електростанцією. Наведені річні витрати на 1 кВт потужності та собівартість виробництва елек-

троенергії для двох варіантів конфігурації ЛВЕС відрізняються несуттєво. Так, для шахового розміщення WES-20 питомі витрати на 1,62%, а собівартість виробництва на 1,59% більші ніж для рівномірного. При використанні MG-H20KW вони на 3,6% і 3,66% відповідно вищі. Проте розміщення MG-H20KW, порівняно з WES-20, за обома схемами забезпечує на 24,2% нижчі питомі витрати та на 22,7% меншу собівартість генерації однієї кВт·год.

Собівартість виробництва електроенергії у всіх розглянутих випадках перевищує середній чинний «зелений» тариф [18] для виробників електроенергії з енергії вітру, що становить 3,0288 грн/кВт·год, мінімум у 1,9 рази. При застосуванні надбавки за використання обладнання WES-20 вітчизняного виробництва, що становить 30,42 коп./кВт·год, відношення мінімальної собівартості до «зеленого» тарифу становить 1,72.

Окремо зазначимо, що рівень покриття ЛВЕС потреб побутових споживачів в електроенергії є доволі низьким та для схеми рівномірного розміщення ВЕУ типу WES-20, котра забезпечує найбільший обсяг генерації в межах розглянутої території, становить 8,95%.

**Висновки.** Проведений аналіз ефективності впровадження локальних вітроелектростанцій у структуру електричних мереж міста на прикладі Індустріального мікрорайону м. Кривого Рогу продемонстрував, що, незважаючи на суттєві капіталовкладення та річні експлуатаційні витрати, застосування ВЕУ вітчизняного виробництва за умови рівномірного їх розміщення в межах роз-

глянутої території дає змогу забезпечити вищу середню вихідну потужність та середньорічне виробництво електроенергії порівняно з агрегатами виробництва КНР. Разом із тим собівартість виробництва електроенергії у всіх розглянутих випадках не покривається коштом «зеленого» тарифу, що діє нині.

Отже, дослідження показало, що впровадження ЛВЕС поряд із житловим мікрорайоном сприяє здебільшого покращенню соціального та екологічного аспектів життя населення. Це досягається шляхом підвищення надійності електропостачання через впровадження резервного джерела живлення та внаслідок зниження рівня

шкідливих викидів при виробництві електроенергії. Разом із тим економічна ефективність залишається на доволі низькому рівні. Одним із напрямів її підвищення є здешевлення генеруючого та акумулюючого обладнання, що дасть змогу знизити загальні капіталовкладення та експлуатаційні витрати. Інший полягає в оптимізації конструкції ВЕУ та удосконаленні систем керування їх електромеханічним обладнанням задля підвищення вихідної потужності вітрогенератора в конкретних вітрових умовах і, як наслідок, збільшення обсягів генерації електроенергії. Комплекс цих заходів дасть змогу знизити собівартість виробництва електроенергії.

#### Список літератури:

1. Drew D.R. Estimating the potential yield of small wind turbines in urban areas: A case study for Greater London, UK / D.R. Drew, J.F. Barlow, T.T. Cockerill. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013. Vol. 115. P. 104–111.
2. Messineo A. Evaluating the Performances of Small Wind Turbines. A Case Study in the South of Italy. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 16. P. 137–145.
3. Stathopoulos T. Urban wind energy: Some views on potential and challenges / T. Stathopoulos, H. Alrawashdeh, A. Al-Quraan et al. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018. Vol. 179. P. 146–157.
4. Saria D.P. A Technical Review of Building Integrated Wind Turbine System and a Sample Simulation Model in Central Java, Indonesia / D.P. Saria, W.B. Kusumaningruma. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 47. P. 29–36.
5. Micallef D. A Review of Urban Wind Energy Research: Aerodynamics and Other Challenges / D. Micallef, G. Van Bussel. *Energies*. 2018. Vol. 11(9), 2204. 27 p.
6. Ng E. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong / E. Ng, C. Yuan, L. Chen, C. Ren, J.C. Fung. *Landscape and Urban Planning*. 2011. Vol. 101. P. 59–74.
7. Calautit K. A Review of Numerical Modelling of Multi-Scale Wind Turbines and Their Environment / K. Calautit, A. Aquino, J.K. Calautit. *Computation*. 2018. Vol. 6(1), 24. 37 p.
8. Anup KC Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review / Anup KC, J. Whale, T. Urmee. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 131. P. 268–283.
9. Van Bussel G.J.W. Small wind turbines for the built environment / G.J.W. van Bussel, S.M. Mertens. *In Proceedings of The Fourth European & African Conference on Wind Engineering*. Prague, 11–15 July, 2005. P. 1–9.
10. Михайленко О.Ю. Структурна та параметрична ідентифікація статистичної моделі розподілу швидкості вітру в міському середовищі / Н.О. Карабут, В.П. Щокін, О.Є. Мельник, А.С. Кузьменко. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. 2019. Т. 30 (69). № 2, Ч. 2. С. 31–41.
11. Лукутин В.Б. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников. Томск : Издательство ТПУ, 2015. 128 с.
12. Chaouachi A. Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States / A. Chaouachi, C.F. Covrig, M. Ardelean. *Energy Policy*. 2017. Vol. 103. P. 179–172.
13. Heier S. *Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems*. John Wiley & Sons, 2014. 494 p.
14. Gumula S. Evaluation of the impact of adjusting the angle of the axis of a wind turbine rotor relative to the flow of air stream on operating parameters of a wind turbine model / S. Gumula, M. Piaskowska-Silarska, K. Pytel, H. Noga, W. Kulinowski. *Proceedings of E3S Web of Conferences*. 2017. Vol. 14. 01016.
15. Півняк Г.Г. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. Дніпропетровськ : НГУ, 2015. 335 с.
16. Hansen K.S. The impact of turbulence intensity and atmospheric stability on power deficits due to wind turbine wakes at Horns Rev wind farm / K.S. Hansen, R.J. Barthelmie, L.E. Jensen, A. Sommer. *Wind Energy*. 2012. Vol. 15(1). P. 183–196.
17. Тарнижевский М.В. Электрооборудование предприятий жилищно-коммунального хозяйства : справочник / М.В. Тарнижевский, Е.И. Афанасьева. Москва : Стройиздат, 1987. 368 с.



18. Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію та надбавки до «зелених» тарифів за дотримання рівня використання обладнання українського виробництва для суб'єктів господарювання : Постанова № 1240 від 27.06.2019 р. Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=42422>.

**Mykhailenko O.Yu., Karabut N.O., Melnyk O.Ye., Kuzmenko A.S., Kolomits H.V. THE EFFECTIVENESS RESEARCH OF USING SMALL WIND TURBINES IN CITIES POWER GRIDS**

*The paper presents effectiveness research results of the integration of a local wind farm with small wind turbines into the cities power grid. For example, the Industrial microdistrict of Kryvyi Rih was taken. The equipment of the wind farm with Ukrainian and Chinese wind turbines with the same nominal power was considered. Wind turbines inside the wind farm were located in two configurations: uniform and chess. The area wind condition statistical models are used to determine power generation.*

*The research results showed that the use of Ukrainian wind turbines at uniform location requires the largest investment and maintenance costs, but covers consumer demand for electricity by 9%.*

*Without reference to wind turbine type, the chess configuration provides less power generation. This is due to the placement of fewer wind turbines compared to a uniform location. The total equipment and maintenance costs are also significantly lower. It should be noted, that the specific costs for 1 kW wind farm power and the power generation cost, for the two comparable configurations almost identical.*

*The use of Chinese wind turbines showed the lowest production cost per kWh, lower costs for the construction and operation of the wind farm. However, consumers demand for electricity satisfied by no more than 5.3%.*

*At the same time, the research results showed that the power generation cost exceeds the current "Green tariff" in Ukraine. Therefore, the local wind farm implementation is aimed, in the majority, at improving the environmental and social aspects of the microdistrict residents' life. Small wind turbines advisable to place near residential areas where possible electricity cuts to improve power system reliability. Also, local wind farms should be installed in cities where high level of air pollution from traditional methods of electricity production is observed.*

*In the considered wind conditions, small wind turbines economic efficiency is low. The wind farm profitability can be achieved by using cheaper equipment, which at the same time provides higher power generation, which will reduce the cost of electricity production.*

**Key words:** *renewable energy, small wind turbine, wind farm, cities power grids, power generation, efficiency, cost price.*