

УДК 621.31:  
535.215

ШВЕДЧИКОВА І. О., ПІСОЦЬКИЙ А. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## ПОПЕРЕДНЯ ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІБРИДНОЇ ВІТРО-СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ЛОКАЛЬНОГО СПОЖИВАЧА

**Мета.** Попередня оцінка характеристик ефективності функціонування гібридної сонячно-вітрової системи, призначеної для забезпечення власних потреб локального споживача, за умови відсутності можливості генерації надлишків енергії відновлюваних джерел до мережі.

**Методика.** Базується на використанні аналітичних методів обробки статистичних даних, які дозволяють проводити детальний аналіз та інтерпретацію отриманих результатів.

**Результати.** Проведено розрахунки показників ефективності – коефіцієнту зменшення витрат та показника самозабезпеченості для підключеного до мережі умовного локального об'єкта з заданим навантаженням. За результатами розрахунків обґрунтовано доцільність вибору локації для розміщення гібридної системи з відновлюваними джерелами енергії. Здійснений аналіз періодів з високою та низькою генерацією відновлюваних джерел в заданій локації для подальшого вибору раціональних параметрів обладнання та стратегій управління потоками енергії для максимальної самозабезпеченості локального споживача.

**Наукова новизна.** Встановлено, що на етапі планування гібридної системи попередню оцінку показників ефективності можна проводити для спрощеної конфігурації системи, в якій не передбачено використання накопичувачів енергії.

**Практична значимість.** В роботі надані рекомендації щодо оцінювання ефективності використання гібридних сонячно-вітрових систем на початкових етапах розробки системи. Показано, що оцінка коефіцієнту зменшення витрат за середньомісячною генерацією відновлюваних джерел енергії, осередненою за багаторічний період, може привести до помилкового результату (завищених значень коефіцієнту). Для більш точних оцінок рекомендується проводити розрахунки показників ефективності за погодинними значеннями генерації відновлюваних джерел.

**Ключові слова:** гібридна система електроживлення; фотоелектрична батарея; вітрогенератор; самоспоживання; самозабезпеченість; коефіцієнт зменшення витрат.

**Вступ.** Гібридна система електроживлення є електричною системою, що «містить більше одного джерела енергії, серед яких принаймні одне є відновлюваним» [1]. Найчастіше на локальних об'єктах (ЛО) відносно невеликої потужності (до 20–50 кВт) побутового та промислового призначення використовують підключені до розподільної мережі (РМ) гібридні системи на основі фотоелектричних батарей (ФБ) та/або вітрогенератора (ВГ) [2, 3]. Використання гібридних систем, які поєднують сонячну та вітрову енергію, є найбільш гнучким варіантом, тому що сприяє підвищенню надійності електропостачання в ЛО.

Останнім часом намітилися тенденція переходу від схем підтримки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) за допомогою пільгових тарифів до самоспоживання, коли електроенергія від ВДЕ споживається в місці її генерації для власних потреб [4, 5]. Згідно [6] самоспоживач енергії з ВДЕ – це «...кінцевий споживач, що працює в рамках свого місця розташування в обмежених кордонах та генерує електроенергію для власного споживання і може накопичувати або продавати самозгенеровану електроенергію з ВДЕ за умови, що для самоспоживачів, які не є домогосподарствами, така діяльність не належить до його головної комерційної чи професійної діяльності». Оцінювання ефективності функціонування таких систем є актуальною науково-технічною задачею.

**Аналіз попередніх досліджень.** Для оцінювання ефективності гібридних систем електроживлення на основі ВДЕ використовують технічні (енергетичні) та економічні

показники [7]. Як зазначено в [7], для гібридних ФБ-ВГ систем промислового призначення можуть бути використані технічні – допустимі значення небалансу потужності, показники надійності та рівень втрат електроенергії, та економічні індикатори – загальна вартість проєкту з ВДЕ, собівартість електроенергії, рівень заміщення традиційних джерел ВДЕ. Для пошуку оптимальних значень показників гібридних систем зазвичай використовують генетичні алгоритми [8, 9]. В [10] наведена економічна оцінка фотоелектричних установок, призначених для задоволення власних потреб промислового об'єкта, показано, що зменшення витрат за споживану електроенергію є ключовим фактором конкурентоздатності таких систем.

На локальному рівні (приватні домогосподарства, малі не побутові споживачі) для оцінки ефективності гібридних систем електроживлення, що працюють на власні потреби, знайшли застосування показники самоспоживання (SC) – для кількісної оцінки виробництва енергії ВДЕ, та самозабезпеченості (SS) – для кількісної оцінки використання енергії від ВДЕ [11–13]. Ці показники приймають значення від 0 до 100%. На практиці профілі виробництва та споживання електроенергії не співпадають: в певні моменти часу спостерігається надлишок генерації від ВДЕ, в інші – генерація ВДЕ може бути нижчою за споживання. Для отримання максимальних значень показників SC та SS необхідно прагнути до максимального наближення вказаних профілів [12].

В роботах [14–16] розглядаються гібридні системи з генерацією електроенергії до РМ. Це дозволяє зменшити споживчі витрати на електроенергію та забезпечити баланс потужності в системі. У той самий час максимальні обсяги генерації до РМ для локальних споживачів можуть бути обмежені умовами договорів на постачання електроенергії. Постачальники енергії також можуть забороняти генерацію надлишкової енергії в мережу з метою підвищення її стабільності та надійності. За умови неможливості скидання надлишку електроенергії в мережу ефективність гібридної системи має визначатися через зменшення витрат за спожиту з РМ електроенергію, яке досягається збільшенням самоспоживання та самодостатності.

Для збільшення власного споживання, як показано в [12, 16–18], рекомендується зберігати надлишкову енергію в накопичувачах енергії, перш за все в акумуляторних батареях (АКБ). В [13] обґрунтовано, що сонячно-вітрові системи з акумуляторними накопичувачами енергії для власного споживання ЛО є найбільш економічно доцільними. Для зменшення надлишків енергії від ВДЕ в гібридних системах пропонуються також інші підходи, які не передбачають використання АКБ та інших накопичувачів енергії. Наприклад, для зменшення надлишків енергії від ВГ змінюють орієнтацію лопатей турбіни [12, 19]. Для зменшення енергії від фотоелектричних модулів змінюють їх робочу точку, коли ФБ змушені працювати не в точці максимальної потужності (МРР) на вольт-амперній характеристиці [12, 20]. Рішення, що не передбачають використання АКБ в гібридних системах, є найпростішими, але їх не можна вважати ефективними, тому що вони не враховують енергетичний баланс з локальним навантаженням, існує висока вірогідність виникнення перевантажень і перенапруг в локальній мережі.

В [21] показано, що в залежності від особливостей енергоринків різних країн можуть використовуватися інші індикатори ефективності гібридних систем. Зокрема, для гібридної фотоелектричної системи, що працює в умовах Марокко, де фінансова підтримка споживачів, які генерують надлишки електричної енергії в мережу, відсутня, пропонується інші технічний та економічний показники. На основі аналізу трьох конфігурацій гібридної системи було встановлено, що найбільш ефективна за технічним індикатором гібридна система не є одночасно ефективною за економічним показником.

Параметри SC та SS розраховуються за певний період часу, зазвичай протягом певного дня, місяця, року або за багаторічний період [22]. В [23] зазначено, що попередню оцінку

ефективності доцільно проводити на етапі планування та проектуванні гібридних систем на основі ВДЕ з врахуванням почасової деталізації даних генерації ВДЕ. Зазвичай використовуються два підходи до моделювання систем: на основі середньомісячних погодинних значень генерації ВДЕ (так звана синтетична генерація) та на основі реальних погодинних почасових рядів даних. В [23] зроблений висновок, що використання даних на основі середньомісячних значень генерації ВДЕ є доцільним на попередніх стадіях проектування систем через високу ступінь невизначеності даних. Для досягнення найбільш точних результатів та проведення більш повного аналізу та оптимізації систем з ВДЕ рекомендується використовувати реальні погодинні дані щодо генерації ВДЕ.

Для оцінювання сонячної радіації та генерації фотоелектричних модулів знайшла застосування база даних PVGIS [24], яка знаходиться у відкритому доступі та надає інформацію на основі моделювання щоденних довгострокових супутникових даних. База даних містить інформацію щодо погодинних та середньомісячних значень потужності генерації ФБ для заданої координати розміщення об'єкта. База даних також містить архів швидкості вітру до 2020 року на висоті 10 м з дискретністю 1 година для типового метеорологічного року (ТМУ). Тому дані PVGIS доцільно також використовувати для попередньої оцінки параметрів ФБ-ВГ систем [25].

Таким чином, аналіз інформаційних джерел показав, що найбільш конкурентоздатними з економічної точки зору для забезпечення власних потреб ЛО є гібридні ФБ-ВГ системи з АКБ. Існують різні методики та показники для оцінки ефективності функціонування таких систем. Найбільшого поширення отримали показники самоспоживання та самозабезпеченості. Існують також методики розрахунку параметрів систем з оцінюванням ефективності їх функціонування, які засновані на досягненні певного значення зниження споживання з РМ. Використовуються розрахункові значення середньомісячної генерації ВДЕ для прийнятого графіка навантаження ЛО. У той самий час оцінка ефективності використання системи за середньомісячною генерацією ВДЕ, особливо розрахованою за тривалий часовий період, не завжди є достатньо об'єктивною. Потребують подальшого вивчення також питання попередньої оцінки ефективності ФБ-ВГ систем на етапі їх розробки.

**Метою дослідження** є попередня оцінка характеристик ефективності функціонування гібридної сонячно-вітрової системи, призначеної для забезпечення власних потреб локального споживача при відсутності генерації надлишків енергії ВДЕ до мережі.

**Результати дослідження.** Важливим етапом розробки гібридної системи з ВДЕ, призначеної для самоспоживання, є вибір раціональних параметрів обладнання (потужності ВДЕ, ємності накопичувачів енергії) та обґрунтування алгоритму управління потоками енергії для максимальної самозабезпеченості ЛО. Цьому етапу зазвичай передують попередня оцінка характеристик системи, їх можливих відхилень та динаміки на основі спрощених підходів.

В [17, 18] для кількісної оцінки економічної вигоди для споживача від функціонування гібридної системи на основі ВДЕ пропонується використовувати коефіцієнт зменшення витрат  $k_E$ , який визначається наступним чином

$$k_E = W_L / W_g = W_L / (W_L - W_R), \quad (1)$$

де  $W_L$  – загальна енергія, що споживається навантаженням;

$W_g$  – енергія, що споживається з мережі ( $W_g \geq 0$  за умови відсутності генерації надлишків енергії ВДЕ до РМ);

$W_R$  – генерація ВДЕ.

Економічну вигоду та ступінь незалежності споживача від мережі також відображає показник самозабезпеченості SS, який описується виразом [11]

$$SS = (W_L - W_g) / W_L. \quad (2)$$

Показники  $k_E$  та SS пов'язані співвідношенням

$$SS = (W_L - W_g) / W_L = 1 - 1 / k_E. \quad (3)$$

Попередню оцінку показників  $k_E$  та SS доцільно проводити для спрощеної конфігурації гібридної системи, в якій не передбачено використання накопичувачів енергії. За цих умов надлишки енергії ВДЕ (при відсутності можливості їх генерації до РМ) втрачаються. Такий варіант побудови системи, як зазначено вище, не є ефективним. У той самий час на початкових етапах розробки систем він дозволяє:

- обґрунтувати доцільність вибору місця розташування гібридної системи з ВДЕ для живлення заданого навантаження ЛО. Можна припустити, якщо для найменш ефективного варіанту гібридної системи будуть отримані задовільні показники ефективності функціонування ( $k_E > 1$ ,  $SS > 0$ ), то для системи з раціональною структурою, параметрами та стратегіями управління потоками енергії ці показники будуть значно вище;

- здійснити аналіз періодів з високою та низькою генерацією ВДЕ в заданій локації для подальшого вибору параметрів та режимів роботи накопичувачів енергії.

Як варіант, приймаємо графік навантаження ЛО з піковим навантаженням  $P_L=200$  Вт [17]. В табл. 1 наведені середні на відповідних інтервалах часу значення максимальної потужності навантаження. Енергія  $W_L$ , що споживається навантаженням за добу (табл. 1), визначається за виразом

$$W_L = \sum_0^{24} P_{Li} \Delta t_i = P_{L12} \Delta t_{12} + P_{L23} \Delta t_{23} + P_{L34} \Delta t_{34} + P_{L45} \Delta t_{45} + P_{L56} \Delta t_{56} + P_{L67} \Delta t_{67} + P_{L71} \Delta t_{71}. \quad (4)$$

та складає, відповідно: влітку  $W_L = 3140$  Вт·год, взимку  $W_L = 3060$  Вт·год, в перехідний період (весна, осінь)  $W_L = 3180$  Вт·год.

Таблиця 1

**Навантаження умовного локального об'єкта**

Місяці	Нічний період ( $t_6, t_7$ ), ( $t_7, t_1$ ), ( $t_1, t_2$ )	Пікові години ( $t_2, t_3$ ), ( $t_5, t_6$ )	Денний період ( $t_3, t_4$ ), ( $t_4, t_5$ )	$W_L$ , Вт·год
Травень-серпень	( $t_7=24.00, t_1=7.00$ ) $P_{L71}=0.2P_L=40$ Вт ( $t_1=7.00, t_2=8.00$ ), ( $t_6=23.00, t_7=24.00$ ), $P_{L12}=P_{L67}=0.3P_L=60$ Вт	( $t_2=8.00, t_3=11.00$ ), ( $t_5=20.00, t_6=23.00$ ), $P_{L23} = P_{L56} = P_L = 200$ Вт	( $t_3=11.00, t_4=16.00$ ) $P_{L34}=0.9P_L=180$ Вт ( $t_4=16.00, t_5=20.00$ ) $P_{L45}=0.8P_L=160$ Вт	3140
Березень, квітень, вересень, жовтень	( $t_7=23.00, t_1=6.00$ ) ( $t_1=6.00, t_2=8.00$ ), ( $t_6=22.00, t_7=23.00$ ), $P_{L12}=P_{L67}=P_{L71}=0.3P_L=60$ Вт	( $t_2=8.00, t_3=10.00$ ), ( $t_5=18.00, t_6=22.00$ ), $P_{L23} = P_{L56} = P_L = 200$ Вт	( $t_3=10.00, t_4=15.00$ ) $P_{L34}=0.9P_L=180$ Вт ( $t_4=15.00, t_5=18.00$ ) $P_{L45}=0.8P_L=160$ Вт	3180
Листопад-лютий	( $t_7=23.00, t_1=6.00$ ) ( $t_1=6.00, t_2=8.00$ ), ( $t_6=21.00, t_7=23.00$ ), $P_{L12}=P_{L67}=P_{L71}=0.3P_L=60$ Вт	( $t_2=8.00, t_3=10.00$ ), ( $t_5=17.00, t_6=21.00$ ), $P_{L23} = P_{L56} = P_L = 200$ Вт	( $t_3=10.00, t_4=15.00$ ) $P_{L34}=0.9P_L=180$ Вт ( $t_4=15.00, t_5=17.00$ ) $P_{L45}=0.8P_L=160$ Вт	3060

Джерело: [17].

Для подальших розрахунків приймаємо ФБ з встановленою потужністю  $P_{PV}=1$  кВт. Використовуємо архівні дані щодо погодинної генерації ФБ  $P_{PV}$ , отримані за допомогою бази даних (БД) PVGIS [24] для передмістя Києва з географічними координатами  $50^{\circ}32'36''$  N,  $30^{\circ}12'43''$  E за період 5 років. Для ЛО з переважно денним споживанням, коли нічне навантаження невелике та відсутня генерація електроенергії до РМ, доцільно використовувати ВГ як допоміжне джерело живлення, меншої, у порівнянні з ФБ, потужності [17]. Для локації з обраними географічними координатами середня швидкість вітру складає 3,36 м/с, тому як базовий варіант можна прийняти вертикально-осьовий ВГ з параметрами: стартова швидкість вітру  $V_{min} = 0,9$  м/с, номінальна швидкість вітру  $V_r = 4,5$  м/с, максимальна робоча швидкість вітру  $V_{max} = 12$  м/с, номінальна потужність  $P_W = 2500$  Вт [25-27]. Середні погодинні дані для швидкості вітру також визначаються за архівними даними бази даних PVGIS [24]. Визначення потужності генерації ВГ  $P_W^*$  (у відносних одиницях) здійснюється у відповідності до [28] за виразом

$$P_W^* = \begin{cases} (V^*)^3, & \text{if } V_{min} / V_r < V^* < 1 \\ 1, & \text{if } V^* = 1, \\ -0,8216(V^*)^2 + 2.1875V^* - 0,3588, & \text{if } 1 < V^* \leq 1.33, \\ 1.1, & \text{if } 1.33 < V^* \leq V_{max} / V_r. \end{cases} \quad (5)$$

Розподіл потоків енергії в системі ФБ-ВГ описується наступним чином [29]

$$W_L = \begin{cases} W_R, & \text{if } W_R \geq W_L \\ W_g, & \text{if } W_R = 0 \\ W_g + W_R, & \text{if } W_R < W_L \end{cases} \quad (6)$$

Далі проводимо перерахунок потужностей ФБ та ВГ відносно встановлених потужностей та у відповідності до величини навантаження. За прийнятого обмеження (6), коли  $W_R < W_L$ , вираз для енергії  $W_L$ , що споживається навантаженням, має вигляд

$$W_L = W_g + W_R,$$

де  $W_R = W_{PV} + W_W$  ( $W_{PV}$ ,  $W_W$  – енергія, що генерується, відповідно, ФБ та ВГ).

В табл. 2 наведені середні за місяць значення генерації ФБ  $W_{PV}$  та ВГ  $W_W$  за період осереднення 5 років (з 2012 по 2016 рр.). Для ВГ наведені також середні значення нічної  $W_{W62}$  та денної  $W_{W26}$  генерації за відповідними інтервалами часу ( $t_6, t_2$ ) – ніч, ( $t_2, t_6$ ) – день.

Таблиця 2

Показники середньомісячної генерації ФБ та ВГ

Показники	Місяці											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$W_{PV}$ , кВт·год	0,98	1,81	2,83	3,83	4,26	4,48	4,37	4,16	3,52	2,47	0,96	1,06
$W_W$ , кВт·год	33,84	28,05	34,02	27,54	22,10	24,16	24,49	20,12	25,56	25,93	31,45	35,34
$W_{W26}$ , кВт·год	19,16	15,69	21,52	18,01	15,16	16,98	16,71	14,10	16,35	16,14	18,07	19,35
$W_{W62}$ , кВт·год	14,68	12,35	12,50	9,53	6,94	7,18	7,78	6,02	9,22	9,74	13,38	15,99

Енергія від ВДЕ  $W_R$ , за якої витрати можуть бути зменшені в  $k_E$  разів, становить [17]

$$W_R = W_L \left(1 - \frac{1}{k_E}\right) = W_L \cdot SS. \quad (7)$$

Загальна генерація ФБ та ВГ [17]

$$W_R = W_{PV} m_p + W_W / m, \quad (8)$$

де  $m_p$  – коефіцієнт перерахунку потужності ФБ відносно встановленої потужності 1 кВт;

$m$  – коефіцієнт перерахунку потужності ВГ по відношенню до значень, наведених в табл. 2 для номінальної потужності ВГ 2,5 кВт.

В нічний час на інтервалі  $(t_6, t_2)$  за відсутності генерації ФБ потрібно забезпечити баланс потужності

$$W_{L62} = W_{g62} + W_{W62} / m.$$

Припускаємо, що на інтервалі  $(t_6, t_2)$  енергія ВГ компенсує споживання навантаження ЛО, споживання з РМ відсутнє  $W_{g62} = 0$ , тоді отримуємо вираз

$$m = \frac{W_{W62}}{W_{L62}}. \quad (9)$$

Найбільша середня генерація ВГ у нічний час  $W_{W62}$  має місце у грудні (табл. 2). Розрахункові значення середньомісячної генерації ВГ  $W_{W62}$  в період весна-літо-осінь значно менше. Відповідно, максимальне значення коефіцієнту  $m$  для  $W_{L62}=660$  Вт·год (табл. 1) складатиме  $m=24,2$ .

Найбільша середня генерація ФБ  $W_{PV}$  спостерігається у червні (4,48 кВт·год). Якщо знехтувати споживанням з мережі в денний час  $W_{g26} = 0$  (при прийнятій потужності ВДЕ це припущення є обґрунтованим), то можна написати наступний вираз для балансу потужності вдень

$$W_{L26} = W_{W26} / m + W_{PV} m_p. \quad (10)$$

Звідки знаходимо коефіцієнт  $m_p = 0,45$ .

Як результат, для прийнятого графіка навантаження з потужністю  $P_L=200$  Вт отримуємо встановлені потужності ФБ  $P_{PVR}=450$  Вт та ВГ  $P_{WR}=103$  Вт, відповідно. В реальних умовах, наприклад, для навантаження  $P_L=5$  кВт будемо мати такі значення потужностей ФБ та ВГ:  $P_{PVR}=11,25$  кВт,  $P_{WR}=2,5$  кВт.

Подальші розрахунки характеристик системи ФБ-ВГ здійснювались за допомогою інструментальних засобів програми Microsoft Excel. До розрахункових таблиць вносились погодинні значення сонячної генерації  $P_{PV}$  та швидкості вітру з архіву БД PVGIS [24] за період 2012-2016 рр. Розрахунки погодинних значень потужності вітрогенерації проводили з використанням формули (5), а погодинної сумарної генерації ВДЕ – за виразом (8). Визначалися показники самозабезпеченості  $k_E$  та  $SS$  за формулами (1)-(3). Оцінка ефективності використання гібридної ФБ-ВГ системи проводилася з врахуванням (6):

- за середньомісячною генерацією ВДЕ, осередненою за п'ятирічний період (з 2012 по 2016 рр.) – показник  $k_{EM}$  в табл. 3;

- за середньомісячною генерацією ВДЕ, розрахованою за погодинними даними – показник  $k_E$  в табл. 3.

На цьому етапі було виявлено, що при розрахунку показника  $k_{EM}$  за середньомісячною генерацією ВДЕ, осередненою за п'ятирічний період, можуть бути отримані помилкові результати із завищенням середньомісячних значень показника зменшення витрат  $k_{EM}$ . Сонячна генерація та швидкість вітру мають випадковий характер та відрізняються високою варіабельністю, тому одиничні виміри сонячної генерації та погодинні значення потужності вітрогенерації, розраховані за даними швидкості вітру, також будуть постійно змінюватись, приймаючи різні значення. В цьому випадку високі та низькі локальні значення погодинної генерації ВДЕ взаємно компенсують одне одного, що призводить до завищених значень  $k_{EM}$ . В табл. 4 для прикладу наведений фрагмент погодинних даних потужності навантаження  $P_L$  та генерації ВДЕ  $P_R$  для грудня місяця 2012 р. Якщо для середньомісячних значень енергії ВДЕ  $W_R=46,95$  кВт·год та навантаження  $W_L=94,86$  кВт·год виконується умова  $W_R < W_L$ , то в певні години 31 грудня 2012 р. спостерігається перевищення погодинної генерації ВДЕ  $P_R$  над потужністю навантаження  $P_L$  ( $P_R > P_L$ ). Враховуючи, що надлишкова енергія ВДЕ не може бути спожита навантаженням, приймалося обмеження  $P_R = P_L$  у відповідності до (6).

Як можна бачити з табл. 3, значення показника  $k_E$ , розраховані за погодинними значеннями генерації ВДЕ, суттєво відрізняються (у 5...10 разів), особливо у період весна-літо-осінь, від  $k_{EM}$ , розрахованого за середньомісячною генерацією ВДЕ, осередненою за п'ятирічний період. У той самий час, в зимовий період ця різниця не настільки суттєва, максимальне та мінімальне значення коефіцієнту ефективності відрізняються у 1,2...1,4 рази. До табл. 3 також додані значення показника самозабезпеченості  $SS$  за період 2012–2016 рр. Розраховані за погодинною генерацією значення показника  $SS$  змінюється від 46,5% (у листопаді) до 63,2% (у грудні).

Таблиця 3

**Результати розрахунку показників самозабезпеченості**

Показ- ники	Місяці											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2012 р.												
$k_E$	1.87	2.45	2.82	2.61	2.52	2.72	2.48	2.58	2.20	1.87	1.66	1.77
2013 р.												
$k_E$	1.65	1.66	2.41	2.51	2.45	2.39	2.93	2.40	2.34	1.72	2.09	1.99
2014 р.												
$k_E$	2.26	1.84	2.67	2.24	2.36	2.61	2.33	2.44	2.57	2.33	1.52	1.93
2015 р.												
$k_{EH}$	2.43	2.95	2.61	2.80	2.47	2.97	3.29	2.74	2.37	2.26	2.61	2.44
2016 р.												
$k_{EH}$	2.43	2.95	2.61	2.80	2.47	2.97	3.29	2.74	2.37	2.26	2.61	2.44
2012–2016 рр.												
$k_{EM}$	2.49	2.77	6.36	10.09	10.11	24.82	19.25	7.15	5.91	3.23	2.29	2.66
$SS, \%$	59.8	63.9	84.3	90.08	90.11	95.97	94.8	86.0	83.1	69.0	56.3	62.4
$k_E$	2.01	2.04	2.61	2.62	2.49	2.71	2.72	2.50	2.41	2.03	1.87	2.06
$SS, \%$	50.24	50.98	61.68	61.8	59.84	63.09	63.23	60.0	58.5	50.73	46.52	51.45

**Висновки.** При розробці гібридних систем з ВДЕ на етапі попередніх досліджень доцільно проводити узагальнюючу оцінку показників ефективності функціонування ( $k_E$ ,  $SS$ ) для спрощеної конфігурації гібридної системи без накопичувачів енергії. В роботі на прикладі ЛО з заданим навантаженням здійснено розрахунок ефективності гібридної системи, який показав, що навіть при використанні системи зі спрощеною структурою існує можливість

зменшення споживання енергії з мережі ( $k_E > 1$ ,  $SS > 0$ ), в середньому, у два рази, що свідчить про достатньо високий потенціал ВДЕ в обраній локації.

Таблиця 4

**Приклад погодинного розрахунку потужності ВДЕ та навантаження для грудня місяця 2012 року**

Дата	Години	$P_L$ , Вт	$P_R$ , Вт	$W_L$ , Вт·год	$W_R$ , Вт·год
01.12.2012	00:00	60	6.61157	94860.0	46950.63
01.12.2012	01:00	60	6.286471		
...	...	...	...		
01.12.2012	22:00	60	26.52071		
01.12.2012	23:00	60	27.93612		
...	...	...	...		
31.12.2012	00:00	60	93.31573		
31.12.2012	01:00	60	80.44298		
...	...	...	...		
31.12.2012	22:00	60	84.5928		
31.12.2012	23:00	60	83.39292		

Встановлено, що при розрахунку показника ефективності за середньомісячною генерацією ВДЕ, осередненою за багаторічний період, можуть бути отримані помилкові результати із завищенням у 5–10 разів показника зменшення витрат  $k_E$ . Для уникнення невизначеності в оцінці ефективності системи, розрахунки показників ефективності необхідно проводити для погодинних значень генерації ВДЕ з врахуванням прийнятих обмежень щодо розподілу потоків енергії в системі.

Напрямок подальших досліджень є обґрунтування алгоритму вибору раціональних параметрів обладнання (потужності ВДЕ, ємності накопичувачів енергії) та сценаріїв управління потоками енергії для максимальної самозабезпеченості ЛО.

**Подяка.** Дана публікація підготовлена за підтримки Міністерства освіти і науки України в рамках спільного українсько-словацького науково-дослідного проекту «Удосконалення енергоменеджменту гібридних фотоелектричних систем локальних об'єктів з акумуляторними батареями» (0123U103763) між Київським національним університетом технологій та дизайну (Україна) та Технічним університетом Кошице (Словачина).

**References**

**Література**

1. Jihane, K., Cherkaoui, M. (2019). Study of the different structures of hybrid systems in renewable energies: A review. *Energy Procedia*, 157, 323–330, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.197>.

2. Cruzatt Quispe, J. S. A., Mendoza Llauri, E. M., Castaneda-Olivera, C. A., Benites Alfaro, E., Cabello Torres, R. J., Espinoza Farfan, E. R. (2022). Implementation of a Wind-solar Hybrid System for Electricity Generation. *Chemical Engineering Transactions*, 92, 187–192, DOI: 10.3303/CET229203.

3. Cruzatt Quispe, J. S. A., Mendoza Llauri, E. M., Castaneda-Olivera, C. A., Benites Alfaro, E., Cabello

1. Jihane K., Cherkaoui M. Study of the different structures of hybrid systems in renewable energies: A review. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 157. P. 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.197>.

2. Cruzatt Quispe J. S. A., Mendoza Llauri E. M., Castaneda-Olivera C. A., Benites Alfaro E., Cabello Torres R. J., Espinoza Farfan E. R. Implementation of a Wind-solar Hybrid System for Electricity Generation. *Chemical Engineering Transactions*. 2022. Vol. 92. P. 187–192. DOI: 10.3303/CET229203.

3. Cruzatt Quispe J. S. A., Mendoza Llauri E. M., Castaneda-Olivera C. A., Benites Alfaro E.,



- Torres, R. J., Espinoza Farfan, E. R. (2022). Implementation of a Wind-solar Hybrid System for Electricity Generation. *Chemical Engineering Transactions*, 92, 187–192, DOI: 10.3303/CET2292032.
4. Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., Palm, J. (2015). Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Appl. Energies*, 142, 80–94, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
5. Pater, S. (2023). Increasing Energy Self-Consumption in Residential Photovoltaic Systems with Heat Pumps in Poland. *Energies*, 16, 4003, <https://doi.org/10.3390/en16104003>.
6. Denysiuk, S., Strzelecki, R., Bohoiko, I., Strzelecki, N. (2023). Analiz osoblyvosti efektyvnoho vprovadzhennia soniachnykh elektrostantsii v lokalnykh systemakh enerhozabezpechennia [Analysis of the features of effective implementation of solar power plants in local energy supply systems]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia = Energy: economy, technologies, ecology*, 2, 7–25, DOI: 10.20535/1813-5420.2.2023.279536 [in Ukrainian].
7. Kuznetsov, M., Lysenko, O., Melnyk, O. (2019). Zadachi optymizatsii kombinovanykh enerhosystem za ekonomichnymy kryteriiamy [Problems of optimization of combined power systems by economic criteria]. *Vidnovliuvana enerhetyka = Renewable Energy*, 4, 6–14, [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4\(59\).6-14](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).6-14) [in Ukrainian].
8. Satish Kumar Ramoji, Bibhuti Bhusan Rath, D. Vijay Kumar (2014). Optimum Design of a Hybrid PV/Wind Energy System Using Genetic Algorithm (GA). *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 4, 38–48, DOI: 10.9790/3021-04153848.
9. Bakhtiar, E., Naeimi, A., Behbahaninia, A., Pignatta, G. (2021). Size Optimization of a Grid-Connected Solar–Wind Hybrid System in NetZero Energy Buildings: A Case Study. *Environ. Sci. Proc.*, 12, <https://doi.org/10.3390/environsciproc2021012012>.
10. Pedrero, J., Hern, P., Martínez, Á. (2021). Economic Evaluation of PV Installations for Self-Consumption in Industrial Parks. *Energies*, 14, 728, <https://doi.org/10.3390/en14030728>.
11. How is Self-Consumption and Self-Sufficiency calculated? URL: <https://support.smappee.com/hc/en-gb/articles/360044277371-How-is-Self-Consumption-and-Self-Sufficiency-calculated->.
12. Ciocia, A., Amato, A., Di Leo, P., Fichera, S., Malgaroli, G., Spertino, F., Tzanova, S. (2021). Self-
- Cabello Torres R. J., Espinoza Farfan E. R. Implementation of a Wind-solar Hybrid System for Electricity Generation. *Chemical Engineering Transactions*. 2022. Vol. 92. P. 187–192. DOI: 10.3303/CET2292032.
4. Luthander R., Widén J., Nilsson D., Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Appl. Energies*. 2015. Vol. 142. P. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
5. Pater S. Increasing Energy Self-Consumption in Residential Photovoltaic Systems with Heat Pumps in Poland. *Energies*. 2023. Vol. 16. Art. 4003. <https://doi.org/10.3390/en16104003>.
6. Денисюк С., Стржелецький Р., Богойко І., Стржелецька Н. Аналіз особливостей ефективного впровадження сонячних електростанцій в локальних системах енергозабезпечення. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 2. С. 7–25. DOI: 10.20535/1813-5420.2.2023.279536.
7. Кузнецов М., Лисенко О., Мельник О. Задачі оптимізації комбінованих енергосистем за економічними критеріями. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 4. С. 6–14. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4\(59\).6-14](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).6-14).
8. Satish Kumar Ramoji, Bibhuti Bhusan Rath, Vijay Kumar D. Optimum Design of a Hybrid PV/Wind Energy System Using Genetic Algorithm (GA). *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2014. Vol. 4. P. 38–48. DOI: 10.9790/3021-04153848.
9. Bakhtiar E., Naeimi A., Behbahaninia A., Pignatta G. Size Optimization of a Grid-Connected Solar – Wind Hybrid System in NetZero Energy Buildings: A Case Study. *Environ. Sci. Proc.* 2021. Vol. 12. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2021012012>.
10. Pedrero J., Hern P., Martínez Á. Economic Evaluation of PV Installations for Self-Consumption in Industrial Parks. *Energies*. 2021. Vol. 14. Art. 728. <https://doi.org/10.3390/en14030728>.
11. How is Self-Consumption and Self-Sufficiency calculated? URL: <https://support.smappee.com/hc/en-gb/articles/360044277371-How-is-Self-Consumption-and-Self-Sufficiency-calculated->.
12. Ciocia A., Amato A., Di Leo P., Fichera S., Malgaroli G., Spertino F., Tzanova S. Self-

Consumption and Self-Sufficiency in Photovoltaic Systems: Effect of Grid Limitation and Storage Installation. *Energies*, 14, 1591, <https://doi.org/10.3390/en14061591>.

13. Camilo, F., Santos, P. (2023). Technical-Economic Evaluation of Residential Wind and Photovoltaic Systems with Self-Consumption and Storage Systems in Portugal. *Energies*, 16, 1805, <https://doi.org/10.3390/en16041805>.

14. Menniti, D., Pinnarelli, A., Sorrentino, N. (2009). A method to improve microgrid reliability by optimal sizing PV/Wind plants and storage systems. *Conference Paper*, DOI: 10.1049/cp.2009.1003.

15. Kartite, J., Cherkaoui, M. (2019). Study of the different structures of hybrid systems in renewable energies: A review. *Energy Procedia*, 157, 323–330, URL: [www.scsiceinecneceidreircetc.ct.ocmom](http://www.scsiceinecneceidreircetc.ct.ocmom).

16. Kamjoo, A., Maheri, A., Putrus, G., Dizqah, A. (2012). Optimal sizing of grid-connected hybrid wind-PV systems with battery bank storage. *Conference Paper*, URL: <https://www.researchgate.net/publication/231205795>.

17. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., Kolcun, M., Medved', D. (2022). Improvement of the Grid-Tied Solar-Wind System with a Storage Battery for the Self-Consumption of a Local Object. *Energies*, 15, 5114, <https://doi.org/10.3390/en15145114>.

18. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., Kolcun, M., Medved', D. (2022). Variant of Implementation of a Grid-Tied Solar-Wind System with a Storage Battery for Self-Consumption of Local Object. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 184–189, <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969234>.

19. Siano, P., Chen, P., Chen, Z., Piccolo, A. (2010). Evaluating maximum wind energy exploitation in active distribution networks. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 4, 598–608, DOI: 10.1049/iet-gtd.2009.0548.

20. Ahmad, J., Spertino, F., Ciocia, A., Di Leo, P. (2015). A maximum power point tracker for module integrated PV systems under rapidly changing irradiance conditions. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, 7–11, <https://doi.org/10.1109/ICSGCE.2015.7454261>.

Consumption and Self-Sufficiency in Photovoltaic Systems: Effect of Grid Limitation and Storage Installation. *Energies*. 2021. Vol. 14. Art. 1591. <https://doi.org/10.3390/en14061591>.

13. Camilo F., Santos P. Technical-Economic Evaluation of Residential Wind and Photovoltaic Systems with Self-Consumption and Storage Systems in Portugal. *Energies*. 2023. Vol. 16. Art. 1805. <https://doi.org/10.3390/en16041805>.

14. Menniti D., Pinnarelli A., Sorrentino N. A method to improve microgrid reliability by optimal sizing PV/Wind plants and storage systems. *Conference Paper*. 2009. DOI: 10.1049/cp.2009.1003.

15. Kartite J., Cherkaoui M. Study of the different structures of hybrid systems in renewable energies: A review. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 157. P. 323–330. URL: [www.scsiceinecneceidreircetc.ct.ocmom](http://www.scsiceinecneceidreircetc.ct.ocmom).

16. Kamjoo A., Maheri A., Putrus G., Dizqah A. Optimal sizing of grid-connected hybrid wind-PV systems with battery bank storage. *Conference Paper*. 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/231205795>.

17. Shavolkin O., Shvedchykova I., Kolcun M., Medved' D. Improvement of the Grid-Tied Solar-Wind System with a Storage Battery for the Self-Consumption of a Local Object. *Energies*. 2022. Vol. 15. Art. 5114. <https://doi.org/10.3390/en15145114>.

18. Shavolkin O., Shvedchykova I., Kolcun M., Medved' D. Variant of Implementation of a Grid-Tied Solar-Wind System with a Storage Battery for Self-Consumption of Local Object. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 184–189. <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969234>.

19. Siano P., Chen P., Chen Z., Piccolo A. Evaluating maximum wind energy exploitation in active distribution networks. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2010. Vol. 4. P. 598–608. DOI: 10.1049/iet-gtd.2009.0548.

20. Ahmad J., Spertino F., Ciocia A., Di Leo P. A maximum power point tracker for module integrated PV systems under rapidly changing irradiance conditions. In: *Proceedings of the 2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*. 2015. P. 7–11. <https://doi.org/10.1109/ICSGCE.2015.7454261>.

21. Andam, M., Alami, J., Louartassi, Y., Zine, R. (2023). Technical and Economic Efficiency in Photovoltaic Battery Systems. *Proceedings of the 8th North American International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, URL: <https://ieomsociety.org/proceedings/2023houston/206.pdf>.
22. Burgio, A., Menniti, D., Sorrentino, N., Pinnarelli, A., Leonowicz, Z. (2020). Influence and Impact of Data Averaging and Temporal Resolution on the Assessment of Energetic, Economic and Technical Issues of Hybrid Photovoltaic-Battery Systems. *Energies*, 13(2), 354, <https://doi.org/10.3390/en13020354>.
23. Caballero, P., Goenka, H. (2019). Solar resource data – time series data vs monthly averages. URL: <https://solargis.com/blog/best-practices/solar-resource-data-time-series-data-vs-monthly-averages>.
24. Photovoltaic geographical information system. URL: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html#SA](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#SA).
25. Shvedchykova, I., Pisotskyi, A., Nicheglod, V. (2021). Porivnialnyi analiz konstruktyvnykh variantiv vitrohenerovalnykh ustanovok [Comparative analysis of design options for wind turbines]. *V Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia MSIE-2021 = V International Scientific and Practical Conference MSIE-2021*, pp. 67–68. URL: [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19198/1/MSIE\\_2021\\_P067-068.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19198/1/MSIE_2021_P067-068.pdf) [in Ukrainian].
26. Vetrogeneratori [Wind generators]. URL: <http://altenergo.biz/vetrogeneratoriy> [in Ukrainian].
27. Vertikalnyi vetrogenerator kW [Vertical wind generator kW]. URL: <https://vaulttec.org.ua/ua/p1780744418-vertikalnyj-vetrogenerator-kvt.html> [in Ukrainian].
28. Shvedchykova, I., Romanchenko, J., Melkonova, I., Melkonov, H., Pisotskii, A. (2022). Possibilities of Electricity Generation Using Small Wind Generators in Eastern Ukraine. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, P. 239–242, DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969319.
29. Qusay, H. (2022). Evaluate the adequacy of self-consumption for sizing photovoltaic system. *Energy Reports*, 8, 239–254, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.205>.
21. Andam M., Alami J., Louartassi Y., Zine R. Technical and Economic Efficiency in Photovoltaic Battery Systems. *Proceedings of the 8th North American International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. 2023. URL: <https://ieomsociety.org/proceedings/2023houston/206.pdf>.
22. Burgio A., Menniti D., Sorrentino N., Pinnarelli A., Leonowicz Z. Influence and Impact of Data Averaging and Temporal Resolution on the Assessment of Energetic, Economic and Technical Issues of Hybrid Photovoltaic-Battery Systems. *Energies*. 2020. Vol. 13(2). Art. 354. <https://doi.org/10.3390/en13020354>.
23. Caballero P., Goenka H. Solar resource data – time series data vs monthly averages. 2019. URL: <https://solargis.com/blog/best-practices/solar-resource-data-time-series-data-vs-monthly-averages>.
24. Photovoltaic geographical information system. URL: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html#SA](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#SA).
25. Шведчикова І., Пісоцький А., Ничеглод В. Порівняльний аналіз конструктивних варіантів вітрогенерувальних установок. *V Міжнародна науково-практична конференція MSIE-2021*. 2021. С. 67–68. URL: [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19198/1/MSIE\\_2021\\_P067-068.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19198/1/MSIE_2021_P067-068.pdf).
26. Вітрогенератори. URL: <http://altenergo.biz/vetrogeneratoriy>.
27. Вертикальний вітрогенератор кВт. URL: <https://vaulttec.org.ua/ua/p1780744418-vertikalnyj-vetrogenerator-kvt.html>.
28. Shvedchykova I., Romanchenko J., Melkonova I., Melkonov H., Pisotskii A. Possibilities of Electricity Generation Using Small Wind Generators in Eastern Ukraine. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 239–242. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969319.
29. Qusay H. Evaluate the adequacy of self-consumption for sizing photovoltaic system. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 239–254. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.205>.

**SHVEDCHYKOVA IRYNA**  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
Department of Computer Engineering  
and Electromechanics  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3005-7385>  
Scopus ID: 6503887672  
Researcher ID: O-2765-2018  
E-mail: [shvedchykova.io@knutd.edu.ua](mailto:shvedchykova.io@knutd.edu.ua)

**PISOTSKYI ANDRII**  
PhD  
Department of Computer Engineering  
and Electromechanics  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0003-3761-2019>  
Scopus ID: 58038796200  
E-mail: [pisotskyi.av@knutd.edu.ua](mailto:pisotskyi.av@knutd.edu.ua)

**SHVEDCHYKOVA I. O., PISOTSKYI A. V.**

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

**PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF A HYBRID  
WIND-SOLAR SYSTEM FUNCTIONING TO PROVIDE THE OWN NEEDS  
OF THE LOCAL CONSUMER**

**Purpose.** A preliminary assessment of the efficiency characteristics of the functioning of a hybrid solar-wind system designed to meet the self-consumption needs of a local consumer, assuming the inability to generate surplus energy from renewable sources to the grid.

**Methodology.** Based on the use of analytical methods of statistical data processing, which enable a detailed analysis and interpretation of the obtained results.

**Findings.** The calculations of efficiency indicators have been carried out - the cost reduction coefficient and the self-sufficiency ratio for a conditional local facility with a specified load connected to the grid. Based on the calculation results, the choice of location for placing a hybrid system with renewable energy sources has been justified. An analysis of periods with high and low renewable energy generation in the specified location has been conducted to determine rational equipment parameters and strategies for energy flows managing for maximum self-sufficiency of the local consumer.

**Originality.** It has been established that during the planning of hybrid system, it is possible preliminary to assess the efficiency indicators for a simplified configuration of a hybrid system that does not involve the use of energy storage devices.

**Practical value.** The paper provides recommendations for evaluating the efficiency of hybrid solar-wind systems at the initial stages of system development. It is shown that assessing the loss reduction coefficient based on the average monthly generation of renewable energy sources, averaged over a multi-year period, can lead to the incorrect result (inflated values of the indicators). For more accurate assessments, it is recommended to calculate efficiency indicators using hourly values of renewable energy generation.

**Keywords:** hybrid power supply system; photovoltaic battery; wind turbine; self-consumption; self-sufficiency; cost reduction factor.