УДК 621.31

ЗЕЛЕНА ЕНЕРГЕТИКА ЯК КЛЮЧОВИЙ ЕЛЕМЕНТ ВПРОВАДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

ДАНИЛЬЧЕНКО Д.О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7912-1849;

ФЕДОРЧУК С.О. канд. техн. наук, старший викладач кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: stanislav.fedorchuk@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7676-8313;

ПОТРИВАЙ А.Е. аспірант кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: andrii.potryvai@ieee.khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1250-7525;

МІНАКОВА К.О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8869-1082;

ПЕТРОВ С.О. канд. техн. наук, доцент, професор кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: serhii.petrov@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6500-5310;

ПЕТРОВА Ю.В. PhD, старший викладач кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: yuliia.petrova@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8184-906X;

Мета роботи. *Метою цієї статті є вивчення ролі "Зеленої енергетики" у концепції розподіленої генерації, аналіз внеску відновлюваних джерел у стабільність енергетики. Основні завдання включають удосконалення моделей фотоелектричних панелей і вітрогенераторів для досягнення екологічної та економічної ефективності.*

Методи дослідження. *Математичне моделювання фотоелектричних панелей та вітрогенераторів, аналіз впливу уточнюючого коефіцієнта та коефіцієнта корисної дії інвертору на електрогенерацію. Використовується порівняльний аналіз отриманих результатів з реальними даними для валідації моделей. Досліджуються аеродинамічні характеристики вітрогенератора та вплив на вихідну потужність. Розробляється оптимізована модель для прогнозування ефективності гібридних систем з використанням зелених технологій.*

Отримані результати. *Отримані результати дослідження розкривають ключовий внесок "Зеленої енергетики" у концепцію розподіленої генерації. Методи математичного моделювання фотоелектричних панелей та вітрогенераторів, разом із застосуванням уточнюючого коефіцієнта та врахуванням ККД інвертору, дозволили покращити точність прогнозування електрогенерації. Розроблена модель враховує аеродинамічні характеристики вітрогенератора, підкреслюючи реалізовану можливість перевищення номінальної потужності відповідно до реальної характеристики. Отримані результати порівнюються з реальними даними для валідації та підтвердження ефективності систем.*

Наукова новизна. *. Полягає в удосконаленні моделі комбінованої генерації фотоелектричних панелей та вітрогенератору, шляхом уточненого врахування роботи інвертору. Також було отримано дані по потенціалу застосування гібридної станції в обраному регіоні та доведено її переваги над застосуванням окремо СЕС та ВЕС.*

Практична цінність. *Полягає в оптимізації прогнозування електрогенерації в гібридних системах, що визначено підвищенням точності та адаптованістю до реальних умов. Дослідження виявляє потенціал для розвитку "Зеленої енергетики" в громадах з великою площею та середньою потужністю.*

Ключові слова: зелена енергетика; розподілена генерація; математичне моделювання; фотоелектричні панелі; вітрогенератори; електрогенерація; гібридні системи.

I. ВСТУП

Період військових дій показав, що концентрація великих потужностей в одному місці є ласою ціллю для терористичних атак, оскільки вихід з ладу потужної підстанції чи електростанції призведе до відключення від електроенергії великої кількості споживачів та може призвести до аварій всієї енергосистеми.

Відхід від централізованої системи електропос-

© Данильченко Д.О., Федорчук С.О., Потривай А.Е., Мінакова К.О., Петров С.О., Петрова Ю.В., 2023
DOI 10.15588/1607-6761-2023-4-4

тачання до розподіленої генерації стає все більш актуальним. Це пов'язано з розвитком відновлювальних (зелених) джерел енергії (ВДЕ), вартістю побудови централізованої системи електропостачання, що зазвичай дорівнює вартості встановлення ВДЕ, відсутність ризиків пов'язаних з терористичними атаками на інфраструктуру централізованої системи електропостачання.

На сьогоднішній момент, для встановлення великої кількості ВДЕ потрібні значні площі, то впровадження такої концепції доречно розпочати з громад які мають значні площі та середню та малу потужності, що споживаються самими громадами.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Зелена енергетика - це напрямок енергетики, який передбачає використання відновлюваних джерел енергії, енергоефективності, рекуперації та екологічності. Україна має ряд стратегій, підходів та документів, які спрямовані на підтримку та розвиток зеленої енергетики, таких як:

- проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року [1], який презентовано Міністерством енергетики та захисту довкілля України у січні 2020 ро. Цей документ визначає національну ціль з енергоефективності, частку відновлюваних джерел енергії, зменшення видобувних галузей та вугільних ТЕС, перехід до кругової економіки та інтеграцію енергетичних ринків України з європейськими;

- Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року [2], який затверджено Кабінетом Міністрів України у грудні 2021 року. Цей документ встановлює національну ціль з енергоефективності до 2030 року, а саме: первинне та кінцеве споживання енергії в Україні у 2030 році не повинне перевищувати відповідно 91 468 тис. та 50 446 тис. тонн нафтового еквіваленту. Також Національним планом встановлюються та описуються низка горизонтальних та секторальних заходів щодо досягнення зазначеної мети (в сферах житлових та бюджетних будівель, транспорту, промисловості, енергетики);

- огляд Стратегії енергетичної безпеки України від Європейсько-Українського Енергетичного Агентства (ЄУЕА) [3], який опубліковано у лютому 2020 року. Цей документ аналізує сильні та слабкі сторони, можливості та загрози для енергетичної безпеки України, а також надає рекомендації щодо забезпечення стабільності, надійності, доступності та сталості енергетичного сектору України.

У світі існує багато стратегій, підходів та документів, що підтримують та розвивають "зелені" технології. Одним з найважливіших є Цілі сталого розвитку (ЦСР), які були ухвалені Організацією Об'єднаних Націй у 2015 році [4] як універсальний заклик до дій щодо скорочення бідності, захисту планети та забезпечення миру та процвітання для всіх людей. ЦСР містять 17 цілей та 169 завдань, які враховують різні аспекти сталого розвитку, включаючи "зелені" технології. Наприклад, Ціль 7 передбачає забезпечення доступу до відновлюваних джерел енергії, Ціль 9 - побудову стійкої інфраструктури та сприяння інноваціям, Ціль 12 - впровадження відповідального споживання та виробництва, Ціль 13 - боротьбу зі зміною клімату, Ціль 14 - збереження морських екосистем, Ціль 15 - збереження екосистем суходолу.

Таким чином ми бачимо, що в глобальній ініціативі «Зелена» енергетика відповідає багатьом критеріям для досягнення поставлених цілей.

Іншим цікавим документом з цієї теми є доповідь Програми розвитку ООН (ПРООН) про соціальні та економічні переваги глобальної «зеленої революції» [5], яка аналізує як посилені короткострокові кліматичні зобов'язання, відомі як національно визначені внески (НВВ), так і довгострокові стратегії, в яких країни описують свої плани щодо досягнення нульового рівня викидів. У доповіді представлені підходи, що застосовуються у п'яти країнах, які ведуть процес справедливого переходу: Антигуа та Барбуда, Коста-Ріка, Індія, Сербія та Південна Африка. У доповіді також визначено п'ять ключових способів, за допомогою яких справедливий перехід може допомогти в реалізації Паризької угоди.

Незважаючи на те, що питання пов'язані з «Зеленою» енергетикою обговорюються та плануються на найвищих рівнях, а стратегії по їх впровадженню носять характер державних та міжнародних політик, нажаль в реальному житті ми бачимо дуже небагато прикладів реалізації цього напрямку. Це пов'язано з відсутністю розуміння населенням та громадами можливих зисків від впровадження, не достатньо пропрацьовано стратегії впровадження цих технологій в електричні системи, не достатньо пропрацьовано системи керування для розподіленої генерації.

III. МЕТА РОБОТИ

Мета роботи полягає у вивченні та визначенні ролі "Зеленої енергетики" як ключового елемента впровадження концепції розподіленої генерації. Досліджуються аспекти використання відновлюваних джерел енергії та їхній внесок у стабільність та сталість енергетичних систем. Аналізується важливість зелених технологій у забезпеченні сталого розвитку та зменшенні впливу на довкілля. Робота спрямована на розуміння та вдосконалення концепцій енергетичного виробництва для підтримки еко-логічної та економічної ефективності. Основні завдання включають в себе удосконалення моделі фотоелектричної панелі за допомогою уточнюючого коефіцієнту, розрахунок впливу коефіцієнта корисної дії (ККД) інвертору на потужність, та розробку моделі вітрогенератора з урахуванням аеродинамічних характеристик. Отримані результати порівнюються з реальними даними для валідації та визначення ефективності роботи систем. Робота спрямована на вдосконалення прогнозу-

вання електрогенерації в гібридних системах та оптимізацію їх ефективності.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Концепція розподіленої генерації має на меті встановлення малопотужних генераторів електроенергії у безпосередній близькості від споживача. При цьому можливе використання низьковольтних ліній електропередачі. Генерація енергії у безпосередній близькості від споживача дозволить розвантажити існуючі лінії електропередач (ЛЕП) та знизити втрати.

Якщо при генерації електроенергії додатково виробляється та споживається теплова енергія, це буде ще одним «бонусом» даної технології. Більше того, з'являється можливість ефективно використовувати локальні енергетичні ресурси – особливо це стосується відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова, енергія біомаси та гідроенергія. Розподілений характер цих джерел енергії успішно збігається з концепцією розподіленої генерації. Залежно від конкретних умов, сонячна електростанція може бути приєднана до централізованих мереж – такий варіант доцільний за потужності електростанції на ВДЕ від кількох десятків кіловат до кількох мегават. Якщо ж джерело енергії невелике, то його краще встановити в безпосередній близькості від споживача.

У разі віддаленого розташування споживачів економічно ефективним буде автономне електропостачання кожного будинку або створення локальної мережі електропостачання, яка отримуватиме енергію від розподілених місцевих джерел електроенергії.

При електрифікації кількох об'єктів і малих селищ, зазвичай, разом із сонячними електричними станціями (СЕС) застосовуються інші джерела енергії: вітроустановки (ВЕС), гідроелектростанції, дизельні електрогенератори тощо. У разі гібридної електростанції вимоги до ємності акумуляторної батареї можуть бути суттєво нижчими, оскільки в періоди недостатнього приходу сонячної енергії з'являється можливість електропостачання споживачів від альтернативних та резервних джерел. В даний час як резервні джерела застосовуються в основному дизельгенератори.

Для керування системою з кількох різних ВДЕ, системи акумулювання та споживачів необхідно розробити відповідні моделі для імітації роботи цих елементів. Найбільш розповсюдженими ВДЕ є СЕС та ВЕС.

В якості об‘єкту дослідження обрано можливе будівництво СЕС та ВЕС потужністю по 1 МВт кожне. Розглянемо громаду, яка знаходиться на східній Україні та має близько 17 тисяч населення. Накопичувачі планується використовувати для компенсації відхилення генерації на ВДЕ від прогнозованих значень, що дозволить їм фактично вийти на гарантовані погодинні значення аналогічно традиційним електричним станціям.

Необхідні для створення моделі та проведення аналізу данні було взято з сайту [6], що надає інформацію по погодним умовам з великої кількості різноманітних джерел. На підставі відкритих даних було отримано інформацію про температуру оточуючого середовища, швидкість вітру та інтенсивності світла з кроком у 15 хвилин, який відповідає вкрай високій точності короткострокових прогнозів, для терміну у 14 років.

Температура є досить важливим вхідним параметром для розробленої моделі, так як вона впливає на генерацію від СЕС та ВЕС. Отримані часові серії температури не потребують додаткової обробки, так як при моделюванні однаково можливо використовувати як градуси Цельсію так і градуси Кельвіну. Загальний вигляд температурної характеристики обраного регіону відображено на рисунку 1.

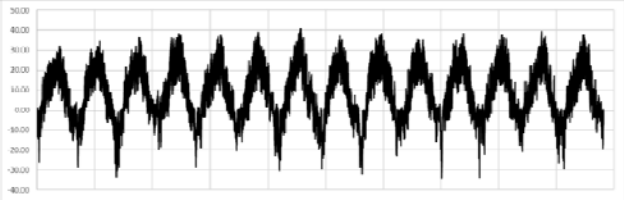

Рисунок 1. Температурна характеристика для громади.

Аналіз кореляції між щорічними значеннями та середнім за обраний період показує співвідношення на рівні 94%. Такий рівень дає змогу встановити, що ми маємо можливість використовувати середні за обраний період значення для кожного інтервалу для проведення моделювання, однак для підвищення точності кращім рішенням буде використати реальні данні. Так аналіз показав, що відхилення у більший бік має дещо більшу вірогідність, а саме 52,09% проти 47,91%. Графік вірогідності відхилення у той або більший бік відображено на рисунку 2. Статистично відносно середнього синтезованого значення для кожного інтервалу середнє відхилення у більший бік складає 21,6%, а у менший – 15,12%. Усереднений температурний графік відображено на рисунку 3.

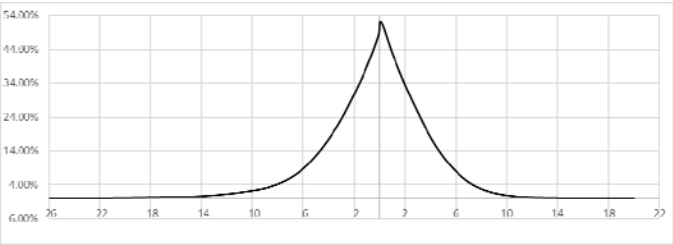

Рисунок 2. Розподіл вірогідності відхилення температури від середнього значення

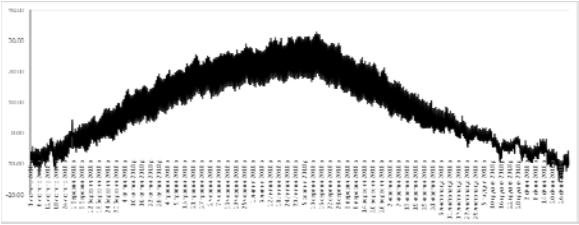

Рисунок 3. Усереднений температурний графік.

Часові серії сонячної радіації можливо отримати для горизонтальної або фіксовано нахиленої поверхні. Саме тому було зроблено вибірку даних для фотоелектричної панелі північної орієнтації з кутом нахилу 60 градусів. Сумарний графік сонячної радіації у обраному регіоні за 14 років має вигляд наведений на рисунку 4.

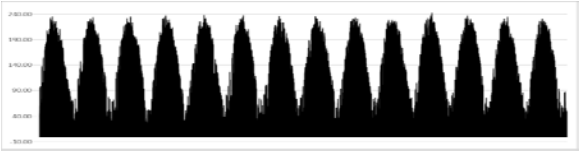

Рисунок 4. Графік сонячної радіації для СЕС з фіксованим кутом нахилу.

При проведенні дослідження виявлено кореляцію річних часових серій з середнім значенням на рівні 93%. Кількість відхилень у більшу сторону переважає та становить близько 75 %. Середнє відхилення у менший бік значно більше за абсолютним значенням та становить 21% проти 15,7%. Графік вірогідності відхилення відображено на рисунку 5. Аналогічно температурним часовим серіям на основі кореляції можливо зробити висновок про допустимість використання середніх для інтервалу значень та перевагу над ними реальних даних. Синтезований графік сонячної радіації відображено на рисунку 6.

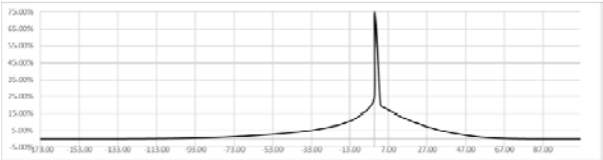

Рисунок 5. Розподіл вірогідності відхилення сонячної радіації від середнього значення.

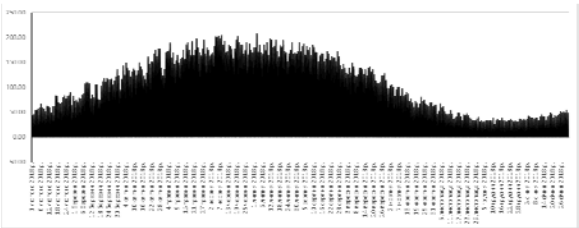

Рисунок 6. Синтезований графік сонячної радіації для СЕС з фіксованим кутом нахилу у обраному регіоні.

Часові серії швидкості вітру для обраного регіону також були отримані на метрологічному сайті [7]. Однак на відміну від попередніх даних кореляція з середнім синтезованим значенням складає лише 44%, що ставить під сумніви можливість використання синтезованого значення.

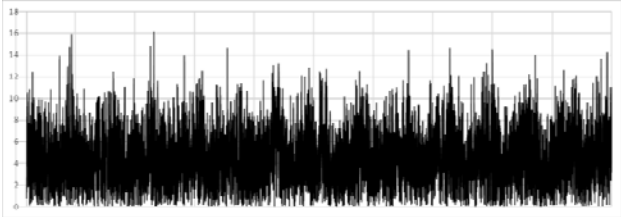

Рисунок 7. Сумарний графік швидкості вітру на 10 метрах висоти.

У випадку, якщо висота башти вітряка буде відрізнятися від стандартної висоти метрологічного вимірювання швидкості вітру 10 м, необхідно використати формулу 1 [8]. З причини складності розташування вітряків у міській межі в якості поправочного коефіцієнту пропонується використати відповідний для сільськогосподарських земель з групами будівель з класом шорсткості 2,5, що становить 0,335.

$$V_1 = V_0 \cdot \left(\frac{H_1}{H_0}\right)^k \qquad (1)$$

Де V1 – швидкість вітра на заданій висоті;

V0 – швидкість вітра на висоті метрологічних досліджень;

H1 – задана висота;

H0 – висота метрологічних досліджень;

k – поправочний коефіцієнт, що відповідає емпіричному показнику шорсткості для обраного регіону;

Ситуація, коли швидкість вітра є меншою за середню має вірогідність 53,9%. Однак середнє відхилення у більший бік складає 85,38% відсотка проти 65,65%. Графік вірогідності відхилень відображено на рисунку 8, а синтезованої середньої швидкості на рисунку 9.

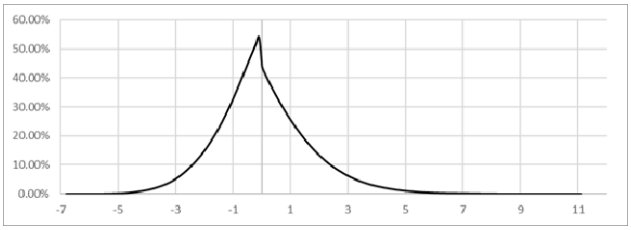

Рисунок 8. Розподіл вірогідності відхилення швидкості вітру від середнього значення.

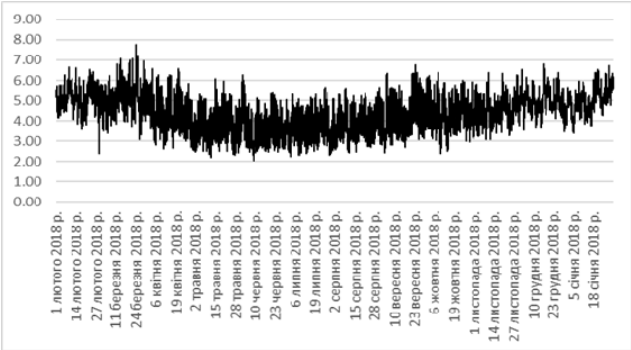

Рисунок 9. Графік швидкості вітру на висоті 10 м для обраного регіону.

Також для перевірки роботи алгоритму, що буде залучати систему акумулювання для компенсації виникаючих відхилень від запланованих графіків генерації, необхідно буде створити штучні відхилення. Для вирішення цієї задачі необхідно буде синтезувати нові графіки генерації з урахуванням можливого добового відхилення на 20% від загальної кількості виробленої енергії. Тому після розробки моделей генеруючого обладнання необхідно буде обробити необхідні вихідні данні по генерації. Якщо для вирішення цієї задачі синтезувати графіки на основі лише погодних відхилень результати матимуть меншу точність. Саме тому необхідно розглянути енергетичне прогнозування на основі вихідних даних з моделями та залучити до цього наступні додаткові умови:

- добове відхилення по кількості виробленої енергії становить максимум 20% для одиничної установки на ВДЕ;

- припускається, що відхилення може бути між мінімальним та максимальним значенням окремо для кожного періоду;

- відхилення повинні підкорятися законам нормального розподілення або реально існуючим графікам вірогідного відхилення;

Модель фотопанелі для швидкого розрахунку значення вихідної потужності базується на рівнянні (2):

$$Ppv = n \cdot f_v \cdot P_{stc} \cdot \frac{G}{G_{stc}} \cdot [1 + k_p \cdot (T_{emp} - T_{stc})] \quad (2)$$

де fv – коефіцієнт зношеності (близько 0.9), що відображає деякі втрати у системі, такі як затінення, старіння або втрати при передачі виробленої енергії;

Pstc – номінальна потужність при стандартних умовах;

G – поточний рівень сонячної іррадіації;

Gstc – рівень сонячної радіації при стандартних умовах;

Kp – температурний коефіцієнт;

Temp – поточний рівень температури;

Tstc – рівень температури при стандартних умовах;

n – кількість фотоелектричних панелей;

Сама модель, виконана у середовищі Simulink має вигляд відображений на рисунку 10, а її покращена версія на 11. Врахування ККД генеруючого обладнання та інверторів виконується за допомогою елементу 1-D lookup table, у якому розраховується значення ККД в залежності від вихідної потужності фотопанелі.

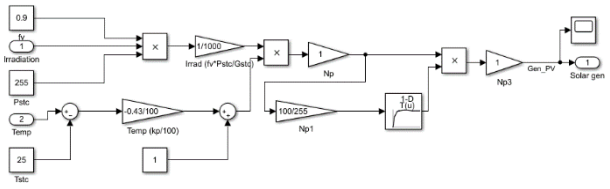

Рисунок 10. Модель сонячної електростанції

Однак такий спрощений розрахунок показує недостатньо високу відповідність до реальних характеристик, що надаються виробниками обладнання. Наприклад при зміні характеристик відповідно до 250 Wp SPV MODULE можливо побачити, що відповідність заявленим розробником даних становить 95,47%. Саме тому було розраховано коефіцієнт кореляції, що збільшує відповідність результатів до заявлених, яку використовують до врахування роботи інвертору. Для цього можливо використати наступне рівняння:

$$P_{pv} = 1.0739 P_{pv0} - 4.07 \quad (3)$$

З урахуванням внесення такої зміни до рівняння модель фотоелектричної панелі отримає вигляд відповідний до рисунку 11. Співвідношення між отриманими характеристиками та реальними наданими виробником [9] показані в таблиці 1.

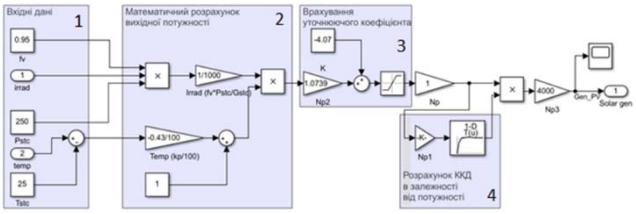

Рисунок 11. Модель сонячної електростанції. Оновлений варіант. Де 1 вхідні дані, 2 математичний розрахунок потужності на основі рівняння (3), 3 врахування уточнюючого коефіцієнту згідно рівнянню (4), 4 розрахунок впливу ККД інвертору в залежності від потужності.

Таблиця 1. Відповідність вихідних даних моделі ФЕП до заявлених виробником

Сонячна радіація, Вт/м^2	Оригінал	Перший варіант моделі	Другий варіант моделі
200	47,1	47,5	46,94
400	97,7	95	97,95
600	148,9	142,5	149
800	200,2	190	200
1000	250,9	237,5	251
Відповідність		95,47%	99,99%

Прикладом такого дослідження може стати аналіз необхідного об'єму накопичення на основі статистичних відхилень при генерації на СЕС та ВЕС. В рамках цього аналізу згідно статистичним даним на кожні 15 хвилин по температурі, швидкості вітру та рівню сонячної радіації за період від 1 лютого 2007 року до 31 грудня 2021 року було промодельована робота однієї фотоелектричної панелі потужністю 250 Вт та одного вітряка номінальною потужністю 10 кВт. Після проведення моделювання генерації на СЕС були отримані дані, що віднесені на рисунки 12 та 13.

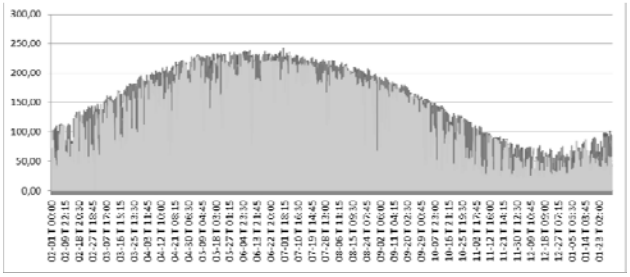

Рисунок 12. Графік генерації однією фотоелектричною панеллю за 14 років, Вт.

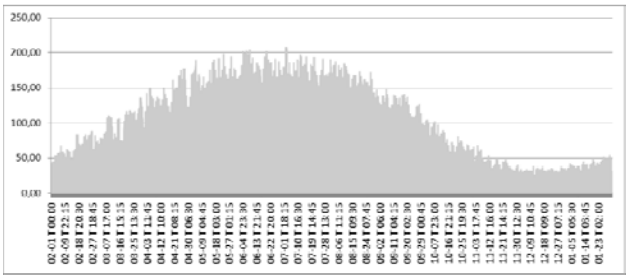

Рисунок 13. Середній за період дослідження графік генерації однією фотоелектричною панеллю, Вт.

В результаті моделювання виявлена загальна кореляція між кожним роком та виведеним середнім значенням, яка складає близько 93%, що дозволяє використовувати середнє розрахункове значення для довгострокових прогнозів. Звичайно, в обраному регіоні найбільша генерація від фотоелектричних панелей відбувається з березня по вересень з піком у червні та липні. Результати моделювання, пов'язані з відхиленням 15 хвилинних значень кожного року від середнього розрахованого, занесено у таблицю 2.

Таблиця 2. Аналіз відхилення генерації однієї фотоелектричної панелі потужністю 250 Вт від середнього прогнозованого.

Параметр	Надлишкова потужність	Недостатня потужність
Максимальне значення, Вт	106,55	172,39
Максимальне значення, %	42	68,95
Середнє значення, Вт	15,76	21,03
Середнє значення, %	6,3	8,41
Кількість відхилень, %	74,72	25,27
Макс тривалість, годин	16	16
Необхідна кількість енергії для зарядки або розрядки у найтяжчий період, Вт·год	274,85	374,32

Згідно отриманим даним для СЕС у обраному регіоні вірогідність відхилення у більшу сторону значно більша ніж у меншу. Однак пікове та середнє значення відхилення у більшу сторону амплітудно нижчі за відхилення у меншу.

Іншим важливим елементом для розрахунків на етапі моделювання є вітрогенератори, що обумовлюється їх аналогічно залежним від погоди характером генерації. Modeling and Simulation of an Autonomous Hybrid Power System [10] пропонує для створення моделі задатися тим, що ВЕС SW-10kW може працювати у чотирьох режимах:

1) Швидкість вітру нижча за мінімально необхідну. В цьому випадку вихідна потужність буде дорівнювати нулю.

2) Швидкість вітру вища за номінальну, але нижча за максимальну. В цьому випадку вихідна потужність буде дорівнювати номінальній.

3) Швидкість вітру вища за максимально допустиму. В цьому випадку вихідна потужність буде дорівнювати нулю (в цьому випадку задля збереження вітрогенератору він припиняє генерацію).

4) Швидкість вітру вища за мінімальну, але нижче номінальної. В цьому випадку вихідна потужність описується рівнянням:

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot (\lambda, \beta) \cdot p(z) \cdot A \cdot V_w^3 \qquad (4)$$

Де P_{wt} – номінальна потужність вітряка;

C_p – аеродинамічний коефіцієнт, існує декілька методів розрахунку в реалізованій моделі використовуються заздалегідь розраховане значення для вхідних умов визначається за рівнянням 6. Підсистему, що використовується для обчислення цього коефіцієнту наведено на рисунку 14;

λ – коефіцієнт передачі швидкості, визначається за рівнянням 4;

β – коефіцієнт, що відображає кут повороту лопатей;

p(z) – щільність повітря на висоті;

V_w – швидкість вітру;

A – площа охоплена лопатями;

n – кількість фотоелектричних панелей;

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{roton} \cdot Rad}{60 \cdot V_w} \quad (5)$$

Де: n_{rotor} – кількість обертів ротору на хвилину;

Rad – радіус площі охопленої лопатями;

$$c_p = 0{,}73 \cdot \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0{,}58 \cdot \beta - 0{,}002 \cdot \beta^{2{,}14} - 13{,}2 \right) \cdot \cdot exp\left[\frac{-18{,}4}{\lambda_i} \right] \quad (6)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0{,}02\beta} - \frac{0{,}003}{\beta^2 + 1}} \quad (7)$$

Аналогічно до моделі СЕС в рамках моделі ВЕС за допомогою 1-d lookup table враховуються і ККД, а саме механічний та електричний. Використання цього елементу обумовлено змінним характером ККД в залежності від швидкості вітру та механічної потужності. Загальний вигляд розробленої моделі відображено на рисунку 15.

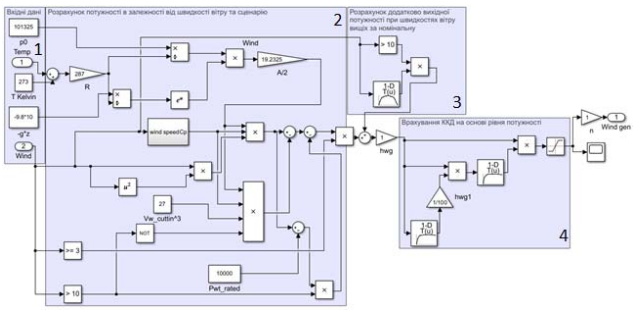

Рисунок 14. Модель вітроелектростанції.

Де: 1 - вхідні дані, 2 - розрахунок потужності в залежності від швидкості вітру відповідно до рівнянь (5-8), 3 - розроблена реалізація розрахунку потужності при швидкості вітру вище за номінальну, 4 - розрахунок впливу механічного і електричного ККД в залежності від потужності.

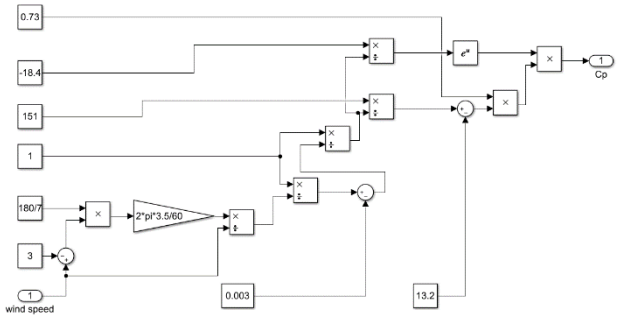

Рисунок 15. Розрахунок аеродинамічного коефіцієнту.

Для перевірки відповідності реальним даним дослідим співвідношення залежності вихідної потужності від швидкості вітру. Для цього побудуємо відповідний графік та проведемо порівняння з реальним прототипом на основі якого було побудовано модель [11], що відображено на рисунку 16.

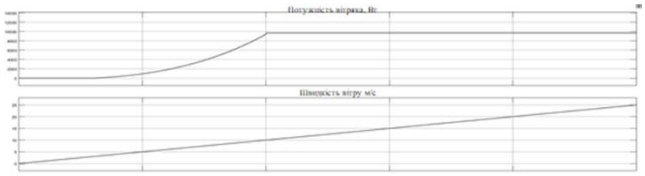

Рисунок 16. Результат дослідження вихідної потужності від швидкості вітру.

При порівнянні результатів з реальними даними виявляється, що пропонуєма Modeling and Simulation of an Autonomous Hybrid Power System модель на швидкості вітру вищій за номінальну не відповідає своєму реальному прототипу. Причиною цього є жорстка фіксація на номінальній потужності при таких швидкостях вітру. Саме тому було додатково враховано можливість видавати потужність вище за номінальну відповідно до реальної характеристики, що дозволило отримати нові вихідні дані відповідні до реального прототипу. Це відображено у лівій половині рисунку 17, а реальні дані, що стали базою для порівняння, показані у правій.

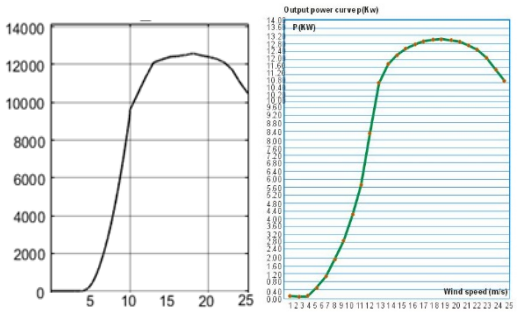

Рисунок 17. Вихідні данні фінального варіанту моделі ВЕС та оригінальні характеристики прототипу.

Результат моделювання роботи одиничного вітрогенератору з номінальною потужністю 10 кВт показує значно інший результат. На відміну від прогнозування для фотоелектричної панелі, результати для ВЕС показують кореляцію між кожним роком та середнім значенням на рівні 40%, що вказує на неможливість використання статистичного прогнозування виключно на основі середніх значень для аналізу роботи вітроустановок. Ще одна відмінність полягає в тому, що найбільша генерація для вітрогенераторів в обраному регіоні відбувається з жовтня по лютий. Саме на основі протилежності у піках річної генерації оптимальний варіант полягає в комбінуванні сонячних та вітроелектростанцій. На основі отриманих даних від моделювання сформовані рисунок 18 та 19.

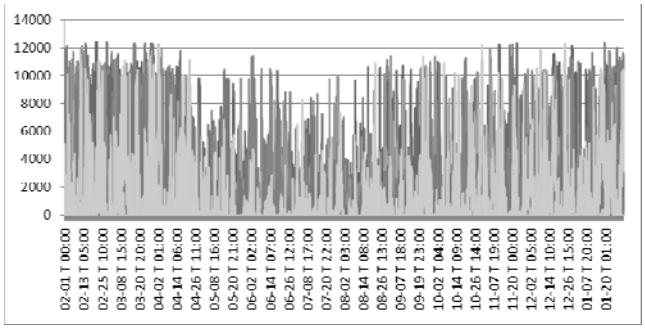

Рисунок 18. Графік генерації одним вітрогенератором, Вт.

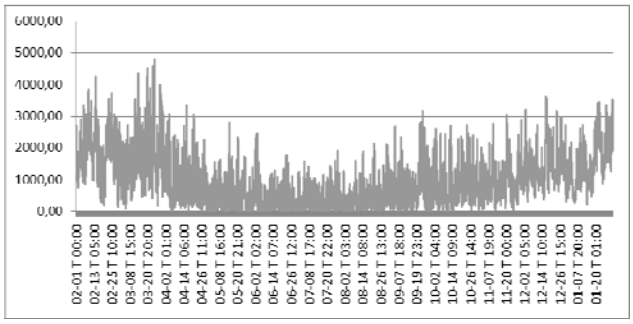

Рисунок 19. Середній за період дослідження графік генерації одним вітрогенератором, Вт.

Результати моделювання, пов'язані з відхиленням 15 хвилинних значень кожного року від середнього розрахованого, занесено у таблицю 3. Загальна картина аналізу також демонструє повну протилежність у порівнянні з ФЕП. Наприклад, надлишкова генерація менш ймовірна але має значно більше амплітудне значення. У пікові моменти відхилення можливі навіть варіанти, коли при відсутності генерації у середньому статистичному прогнозі для інтервалу, реальна генерація працює вище за номінальну потужність, що властиво на певному інтервалі швидкостей вітру для обраного вітряка.

Таблиця 3. Аналіз відхилення генерації вітрогенератору номінальною потужністю 10 кВт від середнього прогнозованого.

Параметр	Надлишкова потужність	Недостатня потужність
Максимальне значення, Вт	11072,46	4796,10
Максимальне значення, %	110	47,96
Середнє значення, Вт	4099,47	949,32
Середнє значення, %	40,99	9,49
Кількість відхилень, %	25,75	74,24
Макс тривалість, годин	181,25	411,75
Необхідна кількість енергії для зарядки або розрядки у найтяжчий період, Вт·год	744772	392081

Даний розділ містить важливий виклад основного матеріалу та аналіз отриманих результатів з моделювання СЕС та ВЕС в східній Україні.

Розроблена модель сонячної електростанції дозволяє прогнозувати генерацію електроенергії на основі сонячної радіації та інших погодних параметрів.

Проведена перевірка моделі на реальних даних свідчить про високу відповідність отриманих результатів та заявленим виробником характеристикам фотопанелей, що підтверджує її точність та ефективність.

Розроблена модель вітрогенератора враховує аеродинамічні та електричні втрати, а також залежність вихідної потужності від швидкості вітру.

Модель показує можливість адаптації до реальних умов шляхом врахування динамічної залежності вихідної потужності від швидкості вітру, що підвищує її точність.

Аналіз результатів генерації електроенергії показує, що комбінування сонячної та вітрової енергії може забезпечити стабільніше виробництво електроенергії протягом року.

Виявлені характеристики генерації дозволяють зробити висновок, що оптимальне використання різних джерел енергії може компенсувати коливання виробництва від одного джерела.

Аналіз відхилень від середніх значень генерації показує, що для СЕС ймовірність відхилення в меншу сторону є меншою, але амплітуда відхилень може бути значною.

Для ВЕС спостерігається низька кореляція між

річною генерацією та середніми значеннями, що свідчить про необхідність індивідуального підходу до прогнозування.

V. ВИСНОВКИ

Дослідження можливості впровадження сонячних електростанцій та вітрогенераторів в обраному регіоні розкриває перспективи та виклики альтернативної та зеленої енергетики. Розроблені моделі СЕС та ВЕС продемонстрували ефективність прогнозування генерації електроенергії, забезпечуючи високу відповідність отриманих результатів заявленим виробником характеристикам.

Зазначена адаптивність моделі ВЕС до реальних умов, зокрема, динамічне врахування залежності вихідної потужності від швидкості вітру, підкреслює її точність та можливість адаптації до різних сценаріїв. Виявлено, що комбінація сонячних та вітрових джерел енергії може сприяти стабілізації виробництва електроенергії протягом року, компенсуючи коливання виробництва від окремих джерел.

Аналіз відхилень та кореляцій генерації вказує на потребу індивідуального підходу до прогнозування, зокрема, для ВЕС, де річна генерація не завжди корелює з середніми значеннями. Отримані результати свідчать про важливість урахування регіональних особливостей та динамічних змін у погодних умовах для точного моделювання систем альтернативної та зеленої енергетики.

У рамках проведеного дослідження було виявлено, що моделі СЕС та ВЕС в обраному регіоні демонструють високий рівень точності у прогнозуванні генерації електроенергії. Модель СЕС, оптимізована з урахуванням уточнюючого коефіцієнту, відображає високу відповідність реальним характеристикам, представленим виробником. Варіант моделі ВЕС, який дозволяє видачу потужності вище за номінальну відповідно до реальних характеристик, дозволяє отримати більш точні відображення динаміки генерації.

У різних частинах року відмічається значна різниця в генерації від ВЕС, що вказує на важливість комплексного підходу до створення енергетичних систем. Результати надають підтримку ідеї комбінування сонячних та вітрових джерел, що дозволяє стабілізувати виробництво електроенергії та забезпечити постійний потік енергії протягом року.

Аналіз відхилень генерації вітрогенератора вказав на необхідність індивідуальних підходів до прогнозування та врахування регіональних особливостей. Зокрема, виявлено, що в середньому статистичному прогнозі можуть виникати ситуації, коли реальна генерація вища за номінальну потужність вітрогенератора, що свідчить про необхідність більш детального врахування динаміки швидкості вітру.

Отже, виявлені особливості та потенціал сонячних та вітрових енергетичних установок у конкретному регіоні надають базу для розвитку стійких та продуктивних енергетичних систем, що використовують зелені технології та сприяють сталому розвитку. Моделі, розроблені в ході дослідження, можуть служити важливим інструментом для оптимізації та удосконалення енергетичних систем на місцевому та глобальному рівнях.

Узагальнюючи, дослідження вказує на перспективи створення стійких та продуктивних енергетичних систем, базованих на використанні відновлювальних джерел енергії та зелених технологій. Розроблені моделі можуть слугувати підґрунтям для подальших досліджень, оптимізації та розгортання альтернативних та зелених енергетичних рішень для сталого розвитку.

Результати вказують на важливість інтеграції сонячних та вітрових джерел у енергетичні системи для забезпечення сталого виробництва електроенергії та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Моделі, розроблені під час дослідження, можуть використовуватися для планування, оптимізації та ефективного використання зелених енергетичних ресурсів.

Таким чином, зелена енергетика, базована на сонячних та вітрових технологіях, визначає новий етап розвитку енергетичної сфери, сприяючи переходу до екологічно чистих та стало ефективних рішень у сфері виробництва електроенергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Презентовано проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року | Кабінет Міністрів України (kmu.gov.ua)

[2] Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року | Держенергоефективності України (saee.gov.ua)

[3] Огляд Стратегії енергетичної безпеки України від ЄУЕА – EUEA - European-Ukrainian Energy agency (euea-energyagency.org)

[4] https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku

[5] How Just Transition can help deliver the Paris Agreement | Climate Promise (undp.org)

[6] Falaghi, H. ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems [Text] / H. Falaghi, M. Haghifam // PowerThech. – 2007. - P. 555-560.

[7] MERRA NASSA [Електронний ресурс] // SoDa pro. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: http://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra

[8] Літвицька О. І. Взаємодія вітрових потоків з

огороджувальними конструкціями висотних будівель / О. І. Літвицька. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2013. – №755. – С. 232–236.

[9] PV Module SPR-343NX-WHT-D [Електронний ресурс] // Solar Hub. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/46685-SPR-343NX-WHT-D-SunPower.

[10] Fikari S. G. Modeling and simulation of an autonomous hybrid power system / Stamatia Gkiala Fikari. – Uppsala, 2015. – 95 с.

[11] SW-10KW WIND TURBINE [Електронний ресурс] // Wind Power. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: https://www.windpowercn.com/products/18.html.

[12] SINGH, Bindeshwar; SHARMA, Janmejay. A review on distributed generation planning. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 529-544.

[13] Fedorchuk, S., Kulapin, O., Ivakhnov, A., Danylchenko, D., Dryvetskyi, S. «Using the Concept of Prosumers as a Staff for Balancing at the Power Grid». Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control, vol 481. Springer, 2023, 223 – 243 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_13

[14] Данильченко, Д. О., С. О. Федорчук, А. В. Івахнов, О. В. Кулапін, і В. В. Гриценко. «Дослідження перспектив застосування соціо-демографічних даних для аналізу потенціалу керування попитом». Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, вип. 1 (4), Липень 2022, с. 11-16, doi:10.20998/2224-0349.2022.01.06.

[15] Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О., Цюпа В. М., Потривай А. Е. «Можливість створення data-керованої сучасної енергосистеми». Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»., № 2 (27), 2022, с. 5-9, https://doi.org/10.31474/2074-2630-2022-2-5-9

[16] Shevchenko S, Danylchenko D, Potryvai A, Minakova K, Dryvetskyi S. Finding Software Ways to Reduce the Error for the Solar Power Plant Simulation Model. Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022; 2022. p. 277-280. DOI: 10.1109/TCSET55632.2022.9766844

[17] Shevchenko, S., Danylchenko, D., Potryvai, A., Miroshnyk, O., Tsiupa, V. & Dryvetskyi, S. 2022, "Improvement of the Simulation Model of a Solar Power Plant, Modernization of the Block for Accounting for the Effect of Cooling Panels by Wind Currents", Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022. DOI 10.1109/MEES58014.2022.10005722

Стаття надійшла до редакції 30.01.2024

GREEN ENERGY AS A KEY ELEMENT OF THE IMPLEMENTATION OF THE CONCEPT OF DISTRIBUTED GENERATION

DANYLCHENKO D.O. — Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Energy Transmission of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7912-1849;

FEDORCHUK S.O. — Ph.D., senior lecturer of the Department of Power Stations of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: stanislav.fedorchuk@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7676-8313;

POTRYVAY A.E. — graduate student of the Department of Electrical Energy Transmission of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: andrii.potryvai@ieee.khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1250-7525;

MINAKOVA K.O. — Ph.D., associate professor, associate professor of the Department of Physics of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8869-1082;

PETROV S.O. — Ph.D., Associate Professor, Professor of the Department of Organic Synthesis and Pharmaceutical Technologies of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: serhii.petrov@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-

6500-5310

PETROVA Y.V. PhD, senior lecturer of the foundry department of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: yuliia.petrova@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8184-906X;

Purpose. *The purpose of this article is to study the role of "Green energy" in the concept of the distributed generation, to analyze the contribution of renewable sources to the energy stability. The main tasks include improving models of photovoltaic panels and wind generators to achieve environmental and economic efficiency.*

Methodology. *Mathematical modeling of photovoltaic panels and wind generators, analysis of the influence of the refining factor and the efficiency factor of the inverter on power generation A comparative analysis of the obtained results with real data is used to validate the models. The aerodynamic characteristics of the wind generator and its impact on the output power are studied. An optimised model is being developed to predict the efficiency of hybrid systems using green technologies*

Findings. *The obtained research results reveal the key contribution of "Green Energy" to the concept of distributed generation. Methods of mathematical modelling of photovoltaic panels and wind turbines, together with the use of a correction factor and consideration of inverter efficiency, have improved the accuracy of power generation. The developed model takes into account the aerodynamic characteristics of the wind generator, emphasizing the realized possibility of exceeding the nominal power in accordance with the real characteristics. The obtained results are compared with real data for validation and confirmation of the effectiveness of the system.*

Originality. *It consists in improving the model of combined generation of photovoltaic panels and a wind generator, by taking into account the operation of the inverter. Data were also obtained on the potential of using a hybrid station in the selected region and its advantages over the use of separate SES and wind turbines were proven.*

Practical value. *It consists in optimizing the forecasting of electricity generation in hybrid systems, which is determined by increasing accuracy and adaptability to real conditions. The study reveals the potential for the development of "Green Energy" in communities with a large area and medium capacity.*

Keywords: green energy; distributed generation; mathematical modeling; photovoltaic panels; wind generators; electricity generation; hybrid systems.

REFERENCES

[1] Prezentovano proekt Kontseptsiyi «zelenoho» enerhetychnoho perekhodu Ukrayiny do 2050 roku | Kabinet Ministriv Ukrayiny (kmu.gov.ua)

[2] Natsional′nyy plan diy z enerhoefektyvnosti na period do 2030 roku | Derzhenerhoefektyvnosti Ukrayiny (saee.gov.ua)

[3] Ohlyad Stratehiyi enerhetychnoyi bezpeky Ukrayiny vid YEUEA – EUEA - European-Ukrainian Energy agency (euea-energyagency.org)

[4] https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku

[5] How Just Transition can help deliver the Paris Agreement | Climate Promise (undp.org)

[6] Falaghi, H. ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems [Text] / H. Falaghi, M. Haghifam // PowerThech. – 2007. - P. 555-560.

[7] MERRA NASSA [Електронний ресурс] // SoDa pro. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: http://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra

[8] Litvyts′ka O. I. Vzayemodiya vitrovykh potokiv z oho-rodzhuval′nymy konstruktsiyamy vysotnykh budivel′ / O. I. Litvyts′ka. // Visnyk Natsional′-noho universytetu "L′vivs′ka politekhnika". – 2013. – №755. – S. 232–236.

[9] PV Module SPR-343NX-WHT-D [Електронний ресурс] // Solar Hub. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/46685-SPR-343NX-WHT-D-SunPower.

[10] Fikari S. G. Modeling and simulation of an autonomous hybrid power system / Stamatia Gkiala Fikari. – Uppsala, 2015. – 95 c.

[11] SW-10KW WIND TURBINE [Електронний ресурс] // Wind Power. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: https://www.windpowercn.com/products/18.html.

[12] SINGH, Bindeshwar; SHARMA, Janmejay. A review on distributed generation planning. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 529-544.

[13] Fedorchuk, S., Kulapin, O., Ivakhnov, A., Danylchenko, D., Dryvetskyi, S. «Using the Concept of Prosumers as a Staff for Balancing at the Power Grid». Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control, vol 481. Springer, 2023, 223 – 243 r.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_13

[14] Danyl′chenko, D. O., S. O. Fedorchuk, A. V. Ivakhnov, O. V. Kulapin, i V. V. Hrytsenko. «Doslidzhennya perspektyv zastosuvannya sotsiodemohrafichnykh danykh dlya analizu potentsialu keruvannya popytom». Visnyk Natsional′noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Enerhetyka: nadiynist′ ta enerhoefektyvnist′, vyp. 1 (4), Lypen′ 2022, s. 11-16, doi:10.20998/2224-0349.2022.01.06.

[15] Shevchenko S. YU., Danyl′chenko D. O., Tsyupa V. M., Potryvay A. E. «Mozhlyvist′ stvorennya datakerovanoyi suchasnoyi enerhosystemy». Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Elektrotekhnika i enerhetyka»., № 2 (27), 2022, s. 5-9, https://doi.org/10.31474/2074-2630-2022-2-5-9

[16] Shevchenko S, Danylchenko D, Potryvai A, Minakova K, Dryvetskyi S. Finding Software Ways to Reduce the Error for the Solar Power Plant Simulation Model. Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022; 2022. p. 277-280. DOI: 10.1109/TCSET55632.2022.9766844

[17] Shevchenko, S., Danylchenko, D., Potryvai, A., Miroshnyk, O., Tsiupa, V. & Dryvetskyi, S. 2022, "Improvement of the Simulation Model of a Solar Power Plant, Modernization of the Block for Accounting for the Effect of Cooling Panels by Wind Currents", Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022. DOI 10.1109/MEES58014.2022.10005722