

Д. т. н. А. А. СФІМЕНКО, Л. І. ПРИСЯЖНЮК

Україна, Національний університет «Одеська політехніка»

E-mail: bogachevalyuba523@gmail.com

МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗТАШУВАННЯ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

Запропоновано моделі розміщення сонячної батареї (або груп батарей у кластері) та метод оптимізації її положення відносно Сонця (кут нахилу та азимут) з метою максимізації генерованої електричної енергії та отримання більш рівномірної генерації потужності у часі. Пропоновані рішення дозволяють моделювати роботу сонячних батарей в різних умовах з використанням комп'ютерної системи Matlab на основі експериментальних досліджень.

Ключові слова: сонячна енергія, сонячні батареї, генерована енергія, кут нахилу, азимут, оптимізація орієнтації.

Ефективністю роботи будь-якої системи, що генерує енергію, є відношення кількості енергії до затрат протягом якогось проміжку часу, наприклад доби, місяця, року. Якщо говорити про сонячні електростанції, то кількість енергії, яку можна отримати, значною мірою залежить від того, яке положення займають сонячні батареї (СБ) та кластери СБ відносно Сонця, їх азимутального положення та нахилу до горизонту. З іншого боку, від положення СБ залежать і затрати на створення та експлуатацію таких електростанцій. При цьому можуть бути дві граничні ситуації:

— фіксоване положення сонячних батарей протягом всього року (або періоду експлуатації), за якого експлуатаційні затрати є мінімальними, але величина генерованої енергії не є максимально можливою;

— розташування СБ змінюється завдяки відстежуванню положення Сонця, в результаті чого можна досягти максимуму генерованої енергії, але затрати на створення та експлуатацію системи енергопостачання при цьому будуть досить великими.

Вирішення завдання, пов'язаного з розташуванням сонячних батарей, має сенс, якщо враховувати, що коливання величини виробленої електроенергії влітку може досягати 40%. В цьому і полягає суперечність між затратами на створення та експлуатацію сонячних електростанцій та величиною генерованої енергії, яку слід розв'язувати, спираючись на можливість отримання значного виграшу.

Пошук раціонального розташування СБ в місцях їх експлуатації є важливим завданням для проєктувальників сонячних електростанцій, оскільки з цим значною мірою пов'язана ефективність роботи батарей. Для цього широко використовуються різні методи оптимізації, і особливо важливим тут є врахування всієї множини різноманітних факторів. Одним з методів, що поєднують в собі зручність та коректність поширення на різні умови та кліматичні зони, є ме-

тод, заснований на врахуванні одночасно двох факторів, а саме кута нахилу та азимуту розташування сонячних батарей, і статистичних даних натурних випробувань для певної місцевості.

Проблему підвищення ефективності функціонування сонячних батарей можна розглядати з точки зору оптимізації різних складових енергетичних систем на базі фотоелектричного перетворення сонячної енергії. Цим питанням присвячується велика кількість досліджень, особливо з огляду на те, що сонячні фотоелектричні панелі стали технологією відновлюваної енергетики, яка зростає найшвидше серед інших джерел світової енергетичної потужності.

У роботі [1] розглядаються важливі питання оптимізації сонячної фотоелектричної енергії, пов'язані з типом сонячних елементів, зміною температури, відстеженням точки максимальної потужності, перетворенням енергії, ефективністю та параметрами охолодження. Це дослідження підтверджує актуальність вдосконалення методів оптимізації, основними цілями яких є максимізація генерованої електроенергії, мінімізація інвестицій, викидів, витрат на експлуатацію і технічне обслуговування та підвищення надійності системи. З іншого боку, питанням оптимізації, пов'язаним з орієнтацією сонячних батарей відносно Сонця, врахуванням місця і кліматичних зон та часового відстежування положень, тут не приділяється достатньої уваги.

З огляду на збільшення частки сонячної енергії в енергопостачанні актуальним стає пошук рішень, направлених на компенсацію коливань між попитом та пропозицією електроенергії протягом певного періоду часу. З цієї метою у дослідженні [2] була проведена оцінка сонячного потенціалу вибраної території, й з урахуванням часової нестабільності енергетичної мікромережі обрано оптимальну орієнтацію соняч-

них панелей. Однак дослідження стосується окремого випадку мікромережі університетського кампусу.

В роботі [3] представлено новий підхід, заснований на історичних кліматичних даних вебсайту NREL, який надає погодинні дані про сонячну активність за більш ніж двадцятирічний період. Оскільки пропонується модель пропуску деякі зайві кроки, це робить її ефективною для визначення оптимальної орієнтації сонячних панелей, виходячи з бажаних цілей, таких як максимум отримуваної річної потужності чи забезпечення пікового попиту в певний час. Слід зазначити, що цей підхід не враховує можливості одночасного розташування в кластері сонячних батарей в різних положеннях, що могло б сприяти максимальній сонячній інсоляції.

Для конкретного розташування на Землі найкраща фіксована орієнтація фотоелектричної панелі може бути визначена шляхом досягнення максимального потоку сонячного випромінювання, що падає протягом року або певного визначеного періоду. З цією метою автори [4] використовують складну модель перенесення випромінювання в атмосфері для розрахунку прямого та розсіяного сонячного випромінювання, що падає на фотоелектричні сонячні панелі. Таким чином визначається найкращий кут нахилу панелі для максимального поглинання сонячного випромінювання за вибраних періодів. При цьому використовується чисельний метод Регула – Фалсі, щоб отримати кут нахилу, за якого похідна сонячної радіації (відносно кута нахилу) наближається до нуля. Крім того, враховується спектральний відгук типових кремнієвих комірок. З іншого боку, за даними авторів, кількість літератури щодо використання спектральних характеристик кремнієвих елементів для коригування сонячного випромінювання з метою покращення розрахунків є дуже обмеженою, якщо вона взагалі існує. Таким чином, це дослідження корисне в умовах відсутності результатів вимірювань або їх ненадійності.

Визначенню кута нахилу сонячної панелі з використанням різних методів оптимізації присвячено роботу [5]. Автори продемонстрували, що для максимального генерування енергії системою важливим є точне визначення кута нахилу, оптимального для конкретного місця розташування. Однак не менш важливим параметром при цьому є азимут розташування сонячної панелі, але зв'язок між цими параметрами тут не розглядається.

Крім сказаного вище, нещодавні дослідження показали, що ефективність перетворення сонячного світла в енергію залежить не тільки від кількості отриманого випромінювання. У роботі [6] автори запропонували модель оптимізації кута нахилу сонячної панелі з використанням алгоритмів машинного навчання, але не з точки зору максимізації отриманого потоку випромінювання, а з метою максимальної ефективності перетворення енергії. З урахуван-

ням різних факторів, таких як погода, рівень запиленості та рівень аерозолів, було побудовано п'ять моделей прогнозування для різних умов застосування. Використання найкращої з отриманих моделей дозволило одержати більший вихід електричної енергії, ніж у випадку застосування моделей пошуку оптимального кута. Проте у цій роботі також не враховується зв'язок кута нахилу та азимуту сонячної панелі.

На противагу цьому в роботі [7], наприклад, стверджується, що для підвищення ефективності роботи СБ найефективніше правильно визначати її азимут, а кут нахилу автори вважають другорядним фактором.

Значне підвищення ефективності сонячних панелей можна отримати за допомогою автоматичних сонячних трекерів, але для можливості широкомасштабного використання таких систем керування дуже важливо знайти недорогі та надійні рішення. Про це йдеться у статті [8], де запропоновано процедуру відстеження, засновану на диференціальному методі та спеціальному мікродетекторі, яка дозволяє повертати сонячні батареї із заходу на схід у діапазоні регулювання кута $0—180^\circ$. Таке рішення є окремим напрямком підвищення ефективності генерування електроенергії, яке супроводжується додатковими витратами на роботу трекерів та систем автоматичного слідкування і керування ними.

Сучасним напрямком сонячної енергетики, що швидко розвивається, є використання двосторонніх вертикально розташованих сонячних панелей. В багатьох інформаційних джерелах, наприклад [9, 10], наводиться інформація про суттєві переваги таких систем, зокрема про збільшення генерованої потужності до 30%. Воно може коливатися в широких межах і залежить від багатьох умов, серед яких багато факторів, що важко піддаються врахуванню і створюють труднощі при моделюванні. На сьогодні дослідницькі устаткування з вертикально розташованими сонячними панелями знаходяться у різних кліматичних умовах — від Іспанії до півночі Норвегії [10], а дослідження їхньої ефективності продовжується. Слід зазначити, що метод, який пропонується нами, за наявності експериментальних даних може сприяти формальному оцінюванню ефективності та оптимізації положення двосторонніх вертикально розташованих сонячних панелей.

Точність визначення кута нахилу сонячних батарей з точки зору максимізації генерування ними електричної енергії залежить, як зазначалося раніше, від умов проведення досліджень. Тому ціла низка робіт присвячена отриманню результатів з орієнтації СБ відповідно до конкретного регіону. Наприклад, в [11] питання досягнення більш ефективного генерування електроенергії досліджуються відносно умов Омана.

Крім сказаного, слід зазначити, що для якісної оптимізації параметрів розташування СБ не менш важливим завданням є також мінімізація необхідно-

го для створення математичних моделей обсягу випробувань [12].

Представлена робота присвячена розробленню моделей та алгоритмів для оптимізації положення сонячних батарей при їх фіксованому розташуванні з метою підвищення ефективності їх роботи, а саме генерування максимальної енергії впродовж визначеного часу, а також зменшення нерівномірності генерування електроенергії в часі. Це дасть можливість, з одного боку, збільшити кількість генерованої енергії без збільшення кількості батарей, а з іншого — зменшити ємність накопичувачів енергії в системах електропостачання.

Моделі та алгоритми оптимізації положення СБ

Окрім граничних рішень, описаних вище, можуть існувати також інші, наприклад:

- фіксоване розташування СБ однієї групи, але по-різному в групах кластера;
- сезонне фіксоване розташування СБ;
- сезонне фіксоване розташування різних груп СБ у кластері тощо.

У будь-якому випадку потрібно знайти такий набір СБ і таке їх положення відносно Сонця, які б дозволяли генерувати максимальну потужність, що буде відповідати оптимальному рішенню.

Потужність СБ визначається залежністю

$$P=f(\alpha, \beta, t), \quad (1)$$

де α, β — кут нахилу та азимут СБ;
 t — час світлового дня.

Але нас цікавить не миттєва потужність, яка постійно змінюється, а електрична енергія E , яку можливо отримати протягом світлового дня, сезону, року.

Математичну модель оптимізації можна представити як

$$E = \max \sum_{i=1}^r P_i t_i, \quad (2)$$

де P_i — потужність, яка досягається в проміжку часу t_i ;
 r — кількість проміжків часу;

або як

$$E = \max \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (3)$$

за умови обмежень:

$$\alpha \in \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\};$$

$$\beta \in \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\},$$

де m, n — кількість положень за кутом місця та за азимутом, відповідно.

Величина потужності (а відповідно, і енергії), що генерується сонячними батареями, достатньо сильно коливається протягом світлового дня. Це є, в першу чергу, результатом мінливості сонячного випромінювання та зміни азимутального положення Сонця та СБ. Таке явище є суттєво негативним для систем сонячної енергетики, особливо автономних. Якщо

припустити, що протягом світлового дня кількість споживаної енергії є більш-менш постійною величиною, то задля забезпечення акумулювання електричної енергії під час її максимальної генерації ємність акумуляторної батареї має бути надлишковою.

Ідеальною є залежність, коли генерована потужність є постійною в часі. Наблизитись до такої характеристики можна, використовуючи декілька СБ з різними залежностями $P=f(t)$, що можна отримати завдяки різній орієнтації СБ. Але задача ускладнюється умовою досягнення при цьому максимальної потужності та, відповідно, енергії протягом заданого часу.

Розв'язання поставленої задачі оптимізації пропонується виконувати поетапно з розділенням на такі частини:

- 1) всі СБ масиву розташовуються в одному з можливих положень;
- 2) групи СБ у кластері розташовуються в різних положеннях для досягнення максимальної енергії генерування;
- 3) аналогічно п. 2, але тут додатковою умовою є вирівнювання величини генерованої енергії впродовж заданого проміжку часу, частіше за все протягом світлового дня, при цьому можуть бути різні пріоритети та обмеження, наприклад:

- генерування максимальної енергії в умовах обмежень нерівномірності генерованої енергії в часі;
- мінімізація нерівномірності генерованої енергії у часі в умовах обмежень мінімального значення енергії протягом всього часу.

Загалом варіантів обмежень може бути достатньо багато, і їх потрібно обирати в конкретній роботі з огляду на поставлену задачу оптимізації. Слід зазначити, що одним з важливих обмежень є термін окупності.

Для всіх трьох частин початковими даними є множина значень генерованої енергії кожною СБ в різних положеннях.

Представимо множину положень матрицею

$$L = \begin{bmatrix} L_{11}, L_{12}, \dots, L_{1j}, \dots, L_{1n} \\ L_{21}, L_{22}, \dots, L_{2j}, \dots, L_{2n} \\ \dots \\ L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{ij}, \dots, L_{in} \\ \dots \\ L_{m1}, L_{m2}, \dots, L_{mj}, \dots, L_{mn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Зазначимо, що матричне представлення даних необхідне через використання для їх оброблення системи комп'ютерної математики Matlab [13, 14], ефективність якої обумовлена, в першу чергу, орієнтацією на матричні обчислювання.

Кожне положення СБ L_{ij} визначається комбінацією дискретних значень кута нахилу α_i та азимута β_j :

$$\alpha_i \in \overline{1, m}; \quad \beta_j \in \overline{1, n}.$$

Відповідно, матриця значень генерованої кожною СБ енергії впродовж проміжку часу від $t_{\text{п}}$ (початок роботи) до $t_{\text{к}}$ (кінець роботи) має вигляд

$$E = \begin{bmatrix} E_{11}, E_{12}, \dots, E_{1j}, \dots, E_{1n} \\ E_{21}, E_{22}, \dots, E_{2j}, \dots, E_{2n} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{ij}, \dots, E_{in} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ E_{m1}, E_{m2}, \dots, E_{mj}, \dots, E_{mn} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Тобто це матриця з множиною значень електричної енергії E_{ij} , яка може бути згенерована СБ у кожному положенні L_{ij} . Ці дані можна вважати коректними для подальшого використання для конкретного типу СБ, місця розташування за широтою, а також дня чи якогось періоду або пори року.

Для формування матриці (5) пропонується метод, заснований на проведенні польових досліджень СБ та використанні можливостей комп'ютерної системи Matlab.

В результаті проведення польових вимірювань отримуємо дискретні значення напруги холостого ходу U_{xx} та струму короткого замикання $I_{\text{кз}}$ у кожному встановленому положенні L_{ij} сонячної батареї для дискретних значень часу $t_{\text{п}}, t_1, t_2, \dots, t_{\text{к}}$. Для зручності подальшої обробки ці значення приводяться до одного параметра потужності за відомою емпіричною формулою

$$P = 0,72 U_{\text{xx}} I_{\text{кз}}. \quad (6)$$

Таким чином ми можемо отримати залежності потужності від часу $P=f(t)$ за їхніми дискретними значеннями для положень L_{ij} при $\alpha_i \in 1, m; \beta_j \in 1, n$.

Щоб перейти від значень потужності до значень енергії, які відповідають матриці (5), скористаємося комп'ютерною системою Matlab. Для цього використаємо такі дії:

- 1) апроксимація табличних даних, що виражається в побудові вузлових точок функції [13, с. 484];
- 2) побудова поліноміальних регресій для табличних даних P_{ij} [13, с. 485];
- 3) інтегрування поліноміальних регресій [13, с. 408] для отримання значень енергії, генерованої СБ протягом заданого часу для кожного її положення.

В результаті отримаємо дані, що відповідають матриці (5). Крім того, для кожного положення СБ маємо поліноміальні регресії та їх графічну інтерпретацію. Наявність цих даних дозволяє перейти до питань оптимізації.

Складемо математичні моделі сформульованих раніше частин оптимізації.

1. Всі сонячні батареї розташовуються однаково, в положенні L_{ij} , якому відповідає значення генерованої енергії E_{ij} . Задача оптимізації полягає в знаходженні положення СБ, що забезпечує генерацію максимальної енергії:

$$E_{ij} = E_{ij \text{ max}}. \quad (7)$$

Для групи, що складається з N батарей, ця модель має вигляд

$$E_{\Sigma ij} = E_{ij \text{ max}} \cdot N. \quad (8)$$

При цьому можуть існувати різні обмеження простору пошуку (матриця (5)), пов'язані з технічною реалізацією сонячної електростанції, зокрема, як зазначалося вище, вартість застосованих технічних рішень не має входити в протиріччя з встановленим терміном окупності.

Це найпростіша задача для оптимізації, яка полягає в перегляді всіх значень E_{ij} та знаходженні максимального.

2. Сонячні батареї всередині групи розташовуються однаково, але положення в одній групі відрізняється від положення в інших групах кластера. Як і в попередньому випадку, потрібно знайти оптимальні положення СБ в групах з точки зору максимізації генерованої енергії, але для цілого кластера. Оскільки в загальному випадку існує величезна кількість можливих варіантів комбінацій груп, для спрощення аналізу будемо розглядати дві однакові за кількістю батарей групи, мінімальна кількість СБ — дві (в різних положеннях). В такому разі математична модель оптимізації виглядатиме так:

$$E_{\Sigma ij} = \max \sum_{k=1}^2 E_{kij}. \quad (9)$$

Таке завдання може бути вирішене за допомогою дискретного програмування з використанням методів повного перебору, покоординатного пошуку та інших [15, 16]. Перший метод надає можливість знайти глобальний екстремум в просторі пошуку, який являє собою множину вузлових точок із відповідними наборами даних, що дозволяють в кожній з цих точок визначити елементи рішення.

На відміну від попереднього випадку, де початкові дані представлені у вигляді матриці (5), в цьому завданні потрібно сформулювати матрицю, яка б надавала значення генерованої енергії кожною парою СБ, об'єднаних за всім різноманіттям їхніх положень. Отримаємо її з матриці (5) шляхом поелементного додавання.

Спочатку додаємо до кожного з елементів матриці (5) перший елемент цієї ж матриці:

$$E^{11} = \begin{bmatrix} (E_{11} + E_{11}), \dots, (E_{1j} + E_{11}), \dots, (E_{1n} + E_{11}) \\ (E_{21} + E_{11}), \dots, (E_{2j} + E_{11}), \dots, (E_{2n} + E_{11}) \\ \dots \\ (E_{i1} + E_{11}), \dots, (E_{ij} + E_{11}), \dots, (E_{in} + E_{11}) \\ \dots \\ (E_{m1} + E_{11}), \dots, (E_{mj} + E_{11}), \dots, (E_{mn} + E_{11}) \end{bmatrix} \cdot (10)$$

На другому кроці додаємо до кожного з елементів матриці (5) другий елемент цієї ж матриці:

$$E^{12} = \begin{bmatrix} (E_{11} + E_{12}), \dots, (E_{1j} + E_{12}), \dots, (E_{1n} + E_{12}) \\ (E_{21} + E_{12}), \dots, (E_{2j} + E_{12}), \dots, (E_{2n} + E_{12}) \\ \dots \\ (E_{i1} + E_{12}), \dots, (E_{ij} + E_{12}), \dots, (E_{in} + E_{12}) \\ \dots \\ (E_{m1} + E_{12}), \dots, (E_{mj} + E_{12}), \dots, (E_{mn} + E_{12}) \end{bmatrix} \cdot (11)$$

Процедура повторюється аж до останнього елемента E_{mn} .

Таким чином буде сформована кінцева матриця, аналогічна за завданням та формою матриці (5), яка в згорнутому стані має вигляд

$$E = \begin{bmatrix} E^{11}, E^{12}, \dots, E^{1j}, \dots, E^{1n} \\ E^{21}, E^{22}, \dots, E^{2j}, \dots, E^{2n} \\ \dots \\ E^{i1}, E^{i2}, \dots, E^{ij}, \dots, E^{in} \\ \dots \\ E^{m1}, E^{m2}, \dots, E^{mj}, \dots, E^{mn} \end{bmatrix} \cdot (12)$$

Кількість вузлових точок простору пошуку, яка відбиває складність матриці в розгорнутому вигляді, можна розрахувати за формулою

$$F = M^l, \quad (13)$$

де M — кількість членів в матриці.

Задача оптимізації полягає у знаходженні максимального зі всіх значень значення суми $E_{ij} + E^{ij}$:

$$E_{ij} + E^{ij} = \max (E_{ij} + E^{ij}). \quad (14)$$

3. Завдання вирівнювання генерованої енергії у часі (назвемо це характеристикою генерування) розглянемо для тих самих умов, що і у п. 2, тобто об'єднання СБ у двох положеннях.

На першому кроці математична модель схожа з попередньою. Початковими даними є матриця даних (12). Цільова функція аналогічна попередній (див. формулу (14)), але відбір буде містити не один варі-

ант з максимальною енергією генерування, а декілька з найбільшими значеннями енергії для можливості подальшого відбору з метою вирівнювання характеристики генерування:

$$(E_{ij} + E^{ij}) \subset \left\{ (E_{ij} + E^{ij})_{\max 1}, (E_{ij} + E^{ij})_{\max 2}, \dots \right\}, \quad (15)$$

де l — кількість відібраних варіантів об'єднання СБ.

Ця множина обмежується відповідно до умови $(E_{ij} + E^{ij})_{\max i} \geq k(E_{ij} + E^{ij})_{\max 1}$, (16)

де k — обмежувальний коефіцієнт, значення якого встановлюється на базі попереднього досвіду або якихось даних (наприклад, $0,9 \leq k \leq 1$).

На другому кроці за відібраними варіантами будуться графічні залежності генерованої потужності від часу $P=f(t)$ (на одному графіку), потім візуально оцінюється нерівномірність їхніх характеристик генерування та відбирається той варіант, який має найбільш рівномірну характеристику. Це відповідає другому пріоритету з раніше встановлених — мінімальної нерівномірності характеристики.

Якщо все ж таки пріоритет віддається максимуму генерованої потужності, то потрібно переглянути результат, зосередившись на генерованій енергії.

Для формальної оцінки нерівномірності характеристики пропонується ввести показник нерівномірності на певному проміжку часу:

$$d = \frac{P(t_2) + P(t_3)}{P(t_1)N_1}, \quad (17)$$

де $P(t_1)$ — максимальна генерована потужність впродовж заданого часу;

$P(t_2), P(t_3)$ — генерована потужність на початку та наприкінці проміжку часу;

N_1 — кількість об'єднаних СБ.

При цьому вводиться обмеження $d > b$, де b — встановлене на основі попередніх знань та даних значення. Вибір варіанта також може проводитись за максимальним значенням d_{\max} .

Спираючись на створені математичні моделі, були розроблені алгоритми їх реалізації для оптимізації положень СБ. Для більшої відповідності попередньому представленню блок-схеми алгоритмів формувалися у вигляді окремих модулів, а саме:

підготовка вхідних даних — **рис. 1**;

оптимізація розміщення СБ в одному положенні — **рис. 2**;

оптимізація розташування СБ в двох положеннях — **рис. 3**;

оптимізація розміщення СБ з вирівнюванням характеристики генерування енергії в часі — **рис. 4**.

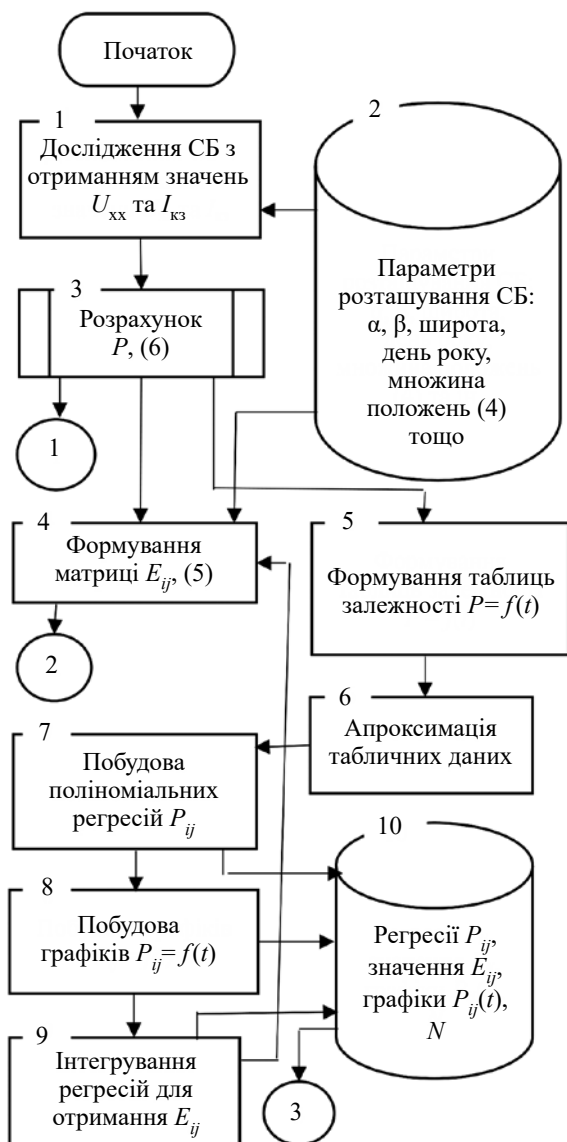


Рис. 1. Блок-схема алгоритма підготовки вхідних даних

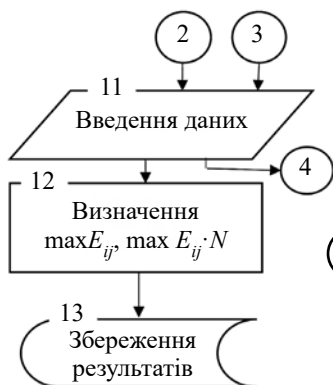


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оптимізації розташування СБ в одному положенні



Рис. 3. Блок-схема алгоритма оптимізації розташування СБ в двох положеннях

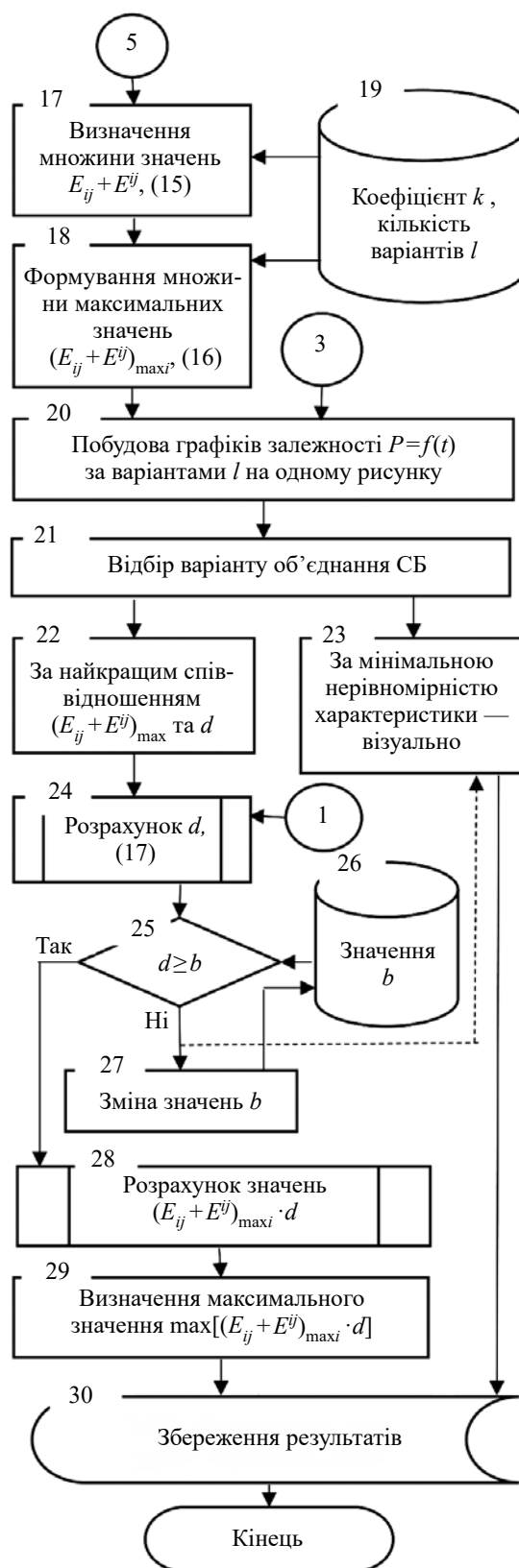


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимізації розташування СБ з вирівнюванням характеристики генерування енергії (штрихова лінія між блоками 25 і 23 — альтернативний шлях реалізації алгоритму, коли виникають труднощі з розрахунком показника d)

Об’єкт досліджень та умови проведення експериментів

Для перевірки теоретичних результатів були проведені експериментальні дослідження СБ у повністю безхмарну погоду на березі моря в Одесі з 7.00 ранку до 12.30 дня 09 липня 2021 року. В різні проміжки часу, які коливались від 30 до 90 хв, були отримані залежності напруги холостого ходу U_{xx} та струму короткого замикання $I_{кз}$ від кута місця α та азимута β сонячної батареї.

Для досліджень використовувалася сонячна панель компанії ABiSOLAR (табл. 1) та пристосування, яке дозволяє виставити СБ у горизонтальне положення, а також дискретно змінювати α та β (рис. 5).

Для вимірювання U_{xx} та $I_{кз}$ використовувалися цифрові мультиметри.

Таблиця 1

Характеристики досліджуваної сонячної панелі
ABiSOLAR AB320-60MHC
(https://abi-solar.com/uk/download/AB-60MHC_PL05.pdf)

Максимальна потужність (P_{max})	320 Вт (0 ± 5 Вт)
Струм короткого замикання ($I_{кз}$)	10,34 А
Напруга холостого ходу (U_{xx})	40,6 В
Струм в точці максимальної потужності (I_{maxP})	9,51 А
Напруга в точці максимальної потужності (U_{maxP})	33,7 В
Максимальна напруга системи	1000 В
Кількість комірок та їхні розміри	120 (6×20) 156,75×78,375 мм
Розмір панелі	1665×992×35 мм
Вага	19 кг
Стандартні умови випробувань	1000 Вт/м ² ; 25°C; AM = 1,5

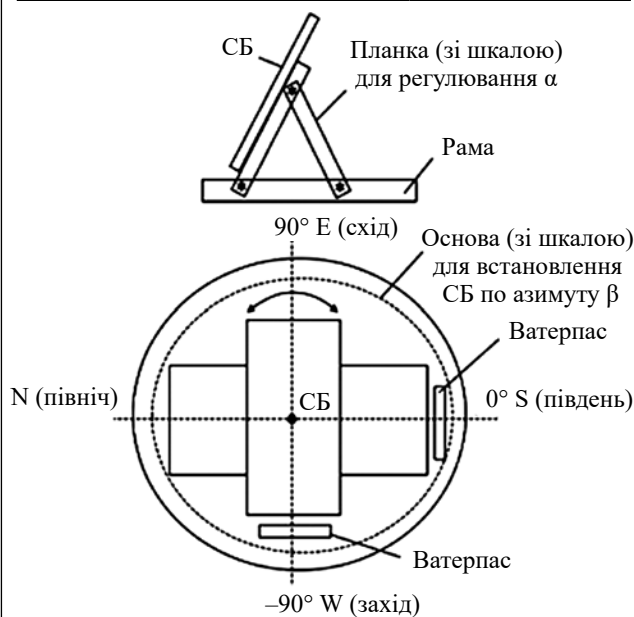


Рис. 5. Ескіз пристосування для проведення досліджень

Послідовність проведення експериментальних досліджень відповідає вищевказаним алгоритмам.

Для зручності залежності $I_{кз}$ та U_{xx} від α та β , отримані в різний час, були приведені до одного параметра — потужності P (1) для дискретних значень факторів:

$$\begin{cases} \alpha \in (15^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 75^\circ; 90^\circ); \\ \beta \in (0^\circ; 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 75^\circ; 90^\circ); \\ t \in (7.20; 7.55; 8.40; 9.10; 9.40; 10.40; 12.20). \end{cases} \quad (18)$$

Для t вказані усереднені значення часу проведення вимірювань у годинах та хвиликах.

Результати досліджень та їх обговорення

Оскільки отриманий у випробуваннях масив даних дуже об’ємний, в табл. 2 для прикладу наводиться частина даних для $\beta = 0^\circ$, тобто при спрямованості панелі на південь. При цьому надаються розраховані за формулою (6) значення потужності.

За даними, наведеними в табл. 2, з використанням комп’ютерної системи Matlab були отримані поліноміальні регресії:

$$\begin{cases} y_1 = -2,5744x^3 + 74,099x^2 - 654,87x + 1886,9; \\ y_2 = -2,7302x^3 + 79,165x^2 - 702,89x + 2006,7; \\ y_3 = -2,8496x^3 + 82,803x^2 - 737,71x + 2097,5; \\ y_4 = -2,8726x^3 + 85,367x^2 - 785,55x + 2314,7; \\ y_5 = -2,1212x^3 + 66,753x^2 - 650,97x + 2034,3; \\ y_6 = 0,62523x^3 - 12,433x^2 + 80,224x - 152,88. \end{cases} \quad (19)$$

На базі цих даних побудовано відповідні графіки залежностей, наведені на рис. 6.

З метою отримання апроксимації, найбільш наближеної до експериментальних величин і водночас прийнятної складності, використовувались регресії третього ступеня (кубічні).

Особливу увагу слід приділити призначенню кількості значущих цифр в коефіцієнтах полінома (програма Matlab дозволяє вибрати від 2 до 5), оскільки від цього суттєво залежить точність моделей регресії та результати подальшого інтегрування. Виходячи з цього, була вибрана максимальна кількість значущих цифр, тобто 5.

В результаті інтегрування цих функцій (поліномів) в межах від 7,3 годин до 12,3 годин з інтервалом 0,5 години були отримані такі значення генерованої енергії у Вт·год:

$$\begin{cases} E_{11} = 796; \\ E_{21} = 747; \\ E_{31} = 681; \\ E_{41} = 566; \\ E_{51} = 393; \\ E_{61} = 202. \end{cases} \quad (20)$$

Дані з випробувань сонячної панелі при $\beta = 0^\circ$

Час t , год	7,3	7,9	8,7	9,2	9,7	10,7	12,3	Умовне позначення	
P , Вт	$\alpha = 15^\circ$	50,6	73,8	104,0	127,6	151,0	214,4	250,9	y_1
	$\alpha = 30^\circ$	35,5	38,9	95,6	117,5	136,8	207,1	257,3	y_2
	$\alpha = 45^\circ$	19,2	26,0	72,3	101,8	133,6	190,5	248,7	y_3
	$\alpha = 60^\circ$	13,9	17,6	48,2	73,3	116,0	158,1	223,0	y_4
	$\alpha = 75^\circ$	13,6	14,8	21,6	42,7	70,4	110,4	179,4	y_5
	$\alpha = 90^\circ$	12,8	14,2	16,7	18,7	24,9	49,2	116,2	y_6

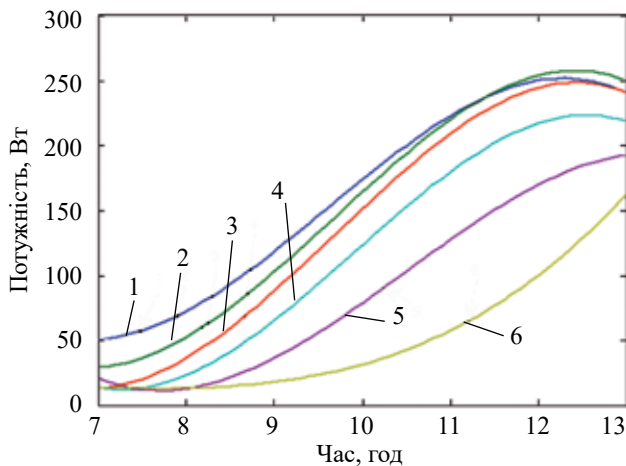


Рис. 6. Графіки зміни потужності у часі при $\beta = 0^\circ$ та різних значеннях α :
 1 — 15° ; 2 — 30° ; 3 — 45° ;
 4 — 60° ; 5 — 75° ; 6 — 90°

Позначення генерованої енергії відповідають першому стовпцю матриці (5) та дискретним значенням α і β , наведеним у (18).

Для проведення подальших досліджень необхідно побудувати поліноміальні залежності та виконати їх інтегрування для усіх значень факторів (18) і сформувані повну матрицю (у дужках вказані розраховані значення генерованої потужності):

$$E = \begin{pmatrix} \frac{E_{11}}{(796)} & \frac{E_{12}}{(811)} & \frac{E_{13}}{(852)} & \frac{E_{14}}{(920)} & \frac{E_{15}}{(948)} & \frac{E_{16}}{(970)} & \frac{E_{17}}{(952)} \\ \frac{E_{21}}{(747)} & \frac{E_{22}}{(815)} & \frac{E_{23}}{(916)} & \frac{E_{24}}{(991)} & \frac{E_{25}}{(1051)} & \frac{E_{26}}{(1093)} & \frac{E_{27}}{(1084)} \\ \frac{E_{31}}{(681)} & \frac{E_{32}}{(799)} & \frac{E_{33}}{(930)} & \frac{E_{34}}{(1028)} & \frac{E_{35}}{(1102)} & \frac{E_{36}}{(1162)} & \frac{E_{37}}{(1148)} \\ \frac{E_{41}}{(566)} & \frac{E_{42}}{(699)} & \frac{E_{43}}{(861)} & \frac{E_{44}}{(990)} & \frac{E_{45}}{(1093)} & \frac{E_{46}}{(1165)} & \frac{E_{47}}{(1165)} \\ \frac{E_{51}}{(393)} & \frac{E_{52}}{(538)} & \frac{E_{53}}{(730)} & \frac{E_{54}}{(874)} & \frac{E_{55}}{(998)} & \frac{E_{56}}{(1077)} & \frac{E_{57}}{(1081)} \\ \frac{E_{61}}{(202)} & \frac{E_{62}}{(318)} & \frac{E_{63}}{(507)} & \frac{E_{64}}{(669)} & \frac{E_{65}}{(799)} & \frac{E_{66}}{(891)} & \frac{E_{67}}{(901)} \end{pmatrix} \cdot (21)$$

Проведення оптимізації

Оптимізація розміщення СБ в одному положенні. Відповідно до алгоритму визначимо оптимальне положення СБ (чи групи СБ), яке відповідає максимальній генерованій енергії (див. рис. 2, блок 12). В умовах відносно невеликої кількості положень, як у нашому прикладі з матрицею (21), зробити це досить просто: переглядаючи значення E_{ij} , можна легко обрати максимальне значення — $E_{46} = E_{47} = 1165$ Вт. Воно відповідає двом положенням: кут місця $\alpha = 60^\circ$ і азимут $\beta = 75^\circ$ та $\beta = 90^\circ$.

При значній кількості положень та інших змінних (день та пора року) оптимальне значення потрібно шукати з використанням програмних засобів.

Оптимізацію розміщення СБ в різних положеннях розглянемо на прикладі об'єднання двох СБ. Актуальність такого об'єднання зростає при розрахунках генерованої енергії протягом всього світлового дня та в різні пори року.

Як і в попередньому прикладі, потрібно сформувати матрицю та знайти максимальне значення генерованої енергії (див. рис. 3, блоки 14, 15).

Матриця, елементи якої розраховуються відповідно до (9), буде мати структуру матриці (21), яка повторюється $n \cdot m$ раз, тобто 42 рази.

Для прикладу наведемо фрагмент такої матриці, яка утворюється шляхом поелементного додавання E_{46} до матриці (21):

$$E^{46} = \begin{pmatrix} 1961 & 1976 & 2017 & 2085 & 2113 & 2135 & 2117 \\ 1912 & 1980 & 2081 & 2156 & 2216 & 2258 & 2249 \\ 1846 & 1964 & 2095 & 2193 & 2267 & 2327 & 2313 \\ 1731 & 1864 & 2026 & 2155 & 2258 & 2330 & 2330 \\ 1558 & 1703 & 1895 & 2039 & 2163 & 2242 & 2246 \\ 1367 & 1483 & 1672 & 1834 & 1964 & 2056 & 2066 \end{pmatrix} \cdot (22)$$

З цього фрагмента можемо виявити положення СБ, що відповідають максимальній генерованій енергії: $E_{46} = E_{47} = 2330$ Вт (для множини E_{46}). Як видно, вони такі ж самі, як і в попередньому випадку: кут місця $\alpha = 60^\circ$ і азимут $\beta = 75^\circ$ та $\beta = 90^\circ$.

Вирівнювання характеристики генерування енергії розглянемо відповідно до наведеного на рис. 4 алгоритма та на прикладі часткової матриці E^{46} (22).

Виберемо множину максимальних значень енергії (див. рис. 4, блок 18), розташованих по мірі зменшення їхньої величини:

$$\left. \begin{aligned} E_{46} = 2330, E_{47} = 2330, E_{36} = 2327, E_{37} = 2313, \\ E_{35} = 2267, E_{45} = 2258, E_{26} = 2258, E_{27} = 2249, \\ E_{57} = 2246, E_{56} = 2242, E_{25} = 2216, E_{34} = 2193. \end{aligned} \right\} (23)$$

Для відбору використано коефіцієнт $0,94 \leq k \leq 1$.

Графічні залежності $P=f(t)$ для відібраних максимальних значень енергії (блок 20) побудуємо з використанням програми Matlab [13, с. 278] шляхом додавання раніше отриманих залежностей.

Наведемо приклад, що ілюструє завдання програми для побудови сумарного графіка двох функцій, заданих поліномами:

```
>> X=7.3: 0.1: 12.3;
>> Y=[(-2.5744·X3 + 74.099·X2 - 654.87·X + 1886.9) +
(2.7302·X3 + 79.165·X2 - 702.89·X + 2006.7)];
>> plot(X, Y).
```

На рис. 7 наведено графіки з найкращими показниками генерованої енергії, відповідно до множини (23). Очевидно, що з цього рисунка візуально вибрати варіант з мінімальною нерівномірністю характеристики (блок 23) практично неможливо через велику кількість кривих. Це можна зробити на екрані комп'ютера або за найкращим співвідношенням $(E_{ij} + E^{ij})_{\max}$ та d (блок 22).

Надалі відповідно до алгоритму (рис. 4) визначається d (блок 24), задається значення b , наприклад $b=0,65$, відбираються варіанти відповідно до блоку 26, розраховуються значення $(E_{ij} + E^{ij})_{\max}$ та d (блок 28). Отримані дані зведені в табл. 3. За найкращим співвідношенням $(E_{ij} + E^{ij})_{\max} \cdot d$ оптимальним є варіант E_{36} (блок 29).

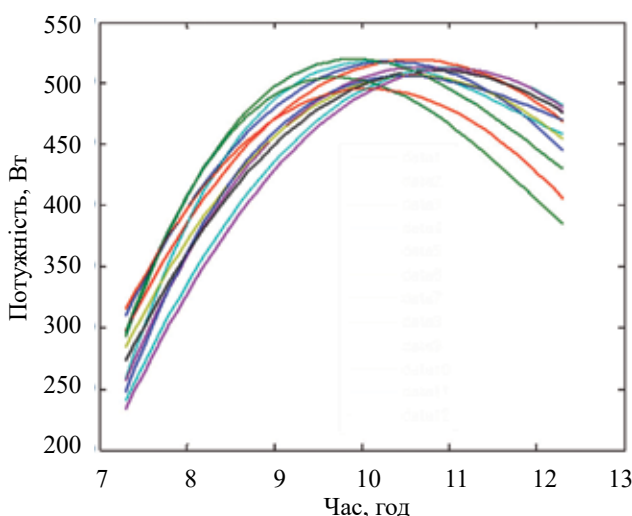


Рис. 7. Графіки зміни генерованої потужності у часі з найкращими показниками

Результати реалізації блоку 28 на рис. 4

Позначення	$P(t_1)$	$P(t_2)$	$P(t_3)$	d	$(E_{ij} + E^{ij})_{\max} \cdot d$
E_{46}	519,6	307,8	443,8	0,723	1685
E_{47}	514,7	286,0	429,3	0,694	1618
E_{36}	523,4	294,8	467,8	0,728	1695
E_{37}	521,0	247,9	457,5	0,676	1565
E_{35}	519,6	251,4	475,3	0,699	1585
E_{45}	510,1	281,4	453,1	0,719	1625
E_{26}	513,7	270,6	475,3	0,726	1640
E_{27}	512,5	239,5	467,8	0,690	1552
E_{57}	498,4	288,3	384,3	0,674	1515
E_{56}	492,6	312,4	404,6	0,727	1631
E_{25}	512,7	241,3	481,3	0,705	1561
E_{34}	508,8	236,5	479,9	0,704	1544

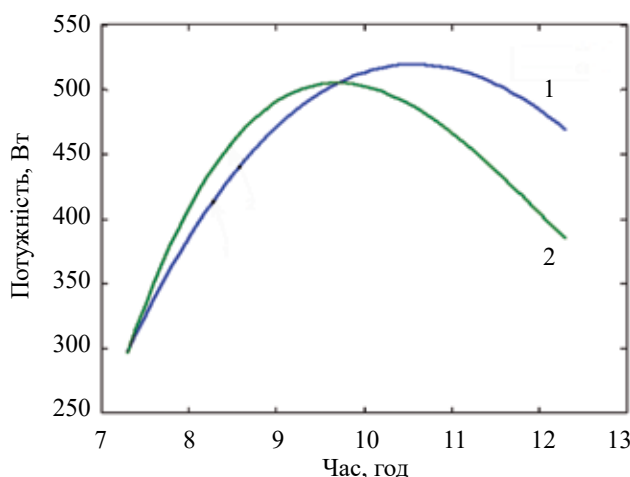


Рис. 8. Графіки зміни генерованої потужності у часі з найбільшим (1) та найменшим (2) показником нерівномірності характеристики

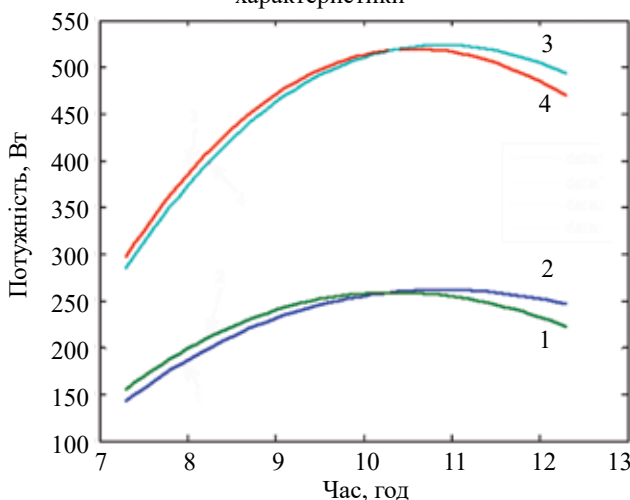


Рис. 9. Графіки зміни генерованої потужності у часі: 1 — E_{36} (первинна); 2 — E_{46} (складова, що додається); 3 — $E_{36} + E_{46}$; 4 — $E_{36} + E_{36}$

Графічна інтерпретація характеристики з найбільшим та найменшим значенням нерівномірності наведена на **рис. 8**.

Можливість візуально оцінити сумарні характеристики з точки зору їх нерівномірності дає **рис. 9**. (Тут різниця генерованої потужності в часі для положень, що відповідають графікам 3 і 4, є незначною, але слід мати на увазі, що ці залежності не є результатом оптимізації, а наведені як приклад використання методу.)

Висновки

Таким чином, в результаті досліджень було розроблено метод оптимізації положення сонячних батарей для ефективного їх використання, а саме для отримання максимальної електричної енергії генерування для випадків повністю фіксованого розташування СБ і у разі сезонної зміни положення. Метод містить математичні моделі, алгоритми та адаптовану значною мірою для практичного використання комп'ютерну систему Matlab як для безпосереднього використання, так і для програмування виконання більш об'ємних обчислювальних операцій. Наведені приклади та результати їх вирішення дають наочне уявлення про застосування методу та його подальший розвиток.

Надалі планується провести експериментальні дослідження сонячних батарей протягом всього світлового дня в різні пори року та сформувати відповідну базу даних, адаптовану до подальшого використання в комп'ютерних програмах. Крім цього, необхідно розробити наскрізну програму для обробки експериментальних даних і моделювання роботи сонячних батарей та їх кластерів в різних умовах.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Al-Shahri Omar A., Ismail Firas B., Hannan M.A. et al. Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 284, 125465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125465>
2. Myeongchan Oh, Hyeong-Dong Park. Optimization of solar panel orientation considering temporal volatility and scenario-based photovoltaic potential: A case study in Seoul national university. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 17, 3262. <https://doi.org/10.3390/en12173262>
3. Naraghi M. H., Atefi E. Optimum solar panel orientation and performance: A climatic data-driven metaheuristic approach. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 2, 624. <https://doi.org/10.3390/en15020624>

4. Masili M., Ventura L. Local tilt optimization of photovoltaic solar panels for maximum radiation absorption. *International Journal of Photoenergy*, 2019, Article ID 3254780. <https://doi.org/10.1155/2019/3254780>

5. Yadav A. K., Chandel S.S. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 23, pp. 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.027>

6. Gi Yong Kim, Doo Sol Han, Zoonky Lee. Solar panel tilt angle optimization using machine learning model: A case study of Daegu city, South Korea. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 3. <https://doi.org/10.3390/en13030529>

7. Слипенченко Н.И., Письменецкий В.А., Фролов А.В. и др. Экспериментальные исследования характеристик солнечной панели KV 150/24(12) в зимних условиях. *Вестник Нац. техн. ун-та “ХПИ” : сб. науч. тр. Темат. вып. : Новые решения в современных технологиях*, Харьков, 2011, № 24, с. 86–92. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/12877>

8. Oltu O., Milea P.L., Dragulinescu M., Franti E. Solar panel energetic efficiency optimization method, based on an specific detector and orientation microsystem. *2007 IEEE International Semiconductor Conference*, Sinaia, Romania. <https://doi.org/10.1109/SMICND.2007.4519663>

9. Bifacial solar panels give increased power output potential. *DS New Energy*, Jun 18, 2019. URL: <https://www.dsnerg.com/info/bifacial-solar-panels-give-increased-power-out-36005894.html>

10. *vertical.solar*. URL: <https://vertical.solar>

11. Kazem H. A., Khatib T., Alwaeli A. A. K. Optimization of photovoltaic modules tilt angle for Oman. *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, Langkawi, Malaysia, 2013, pp. 703–707. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564637>

12. Сфіменко А.А., Логвінов О.В., Присяжнюк Л.І. Використання повного факторного експерименту для моделювання генерації електроенергії сонячними батареями. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2022, №4–6, с. 32–38. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2022.4-6.32>

13. Дьяконов В.П. *МАТЛАВ. Полный самоучитель*. М., ДМК Пресс, 2012, 768 с.

14. Paluszek M., Thomas S. *Practical MATLAB Deep Learning*. APress, 2020, 252 p.

15. Фролов В.А. *Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС*. Київ, Вища школа, 1991, 310 с.

16. Кохендерфер М., Уилер Т. *Алгоритмы оптимизации*. М., Вильямс, 2020, 528 с.

Дата надходження рукопису
до редакції 13.10 2023 р.

Опис статті для цитування:

Сфіменко А. А., Присяжнюк Л. І. Моделі та алгоритми оптимізації розташування сонячних батарей. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 3–4, с. 24–34. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.3-4.24>

Cite the article as:

Yefimenko A. A., Prisyazhniuk L. I. Models and algorithms for optimizing the location of solar batteries. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 3–4, pp. 24–34. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.3-4.24>

MODELS AND ALGORITHMS FOR OPTIMIZING THE LOCATION
OF SOLAR BATTERIES

The study aimed to create a method for optimizing the position of solar batteries with fixed location to increase their efficiency, namely, the generation of maximum energy during a certain time, as well as reducing the unevenness of electricity generation over time.

The study allowed developing a method of optimizing the position of solar batteries to increase their efficiency, namely obtaining the maximum electrical energy generation both with a completely fixed location of solar batteries and with a seasonal change in position.

The developed models and algorithms, the given examples and the results of their solution with the construction of polynomial regressions and their graphical representation, integration of polynomials to obtain the values of the generated energy give a clear idea of the application of the method of optimizing the position of solar panels to maximize the generated energy and equalize the generation characteristics over time, as well as ways to develop them further.

The theoretical research made it possible to solve an important scientific and technical problem of increasing the performance of solar batteries by placing them in an optimal position relative to the Sun. The model of placement of the solar battery and the method that allows optimizing its position were further developed. The field of using the Matlab computer program for simulating the operation of solar batteries was further expanded. For the first time, the work offers a model and method of using solar cells with different positions relative to the Sun designed to increase the amount of electric energy generated and equalize the energy generation characteristic, which is expressed as a dependence of power over time. For this purpose, the authors introduce the coefficient of unevenness of the generation characteristic, which establishes the relationship between the maximum power and the capacities at other moments of time and allows objectively evaluating the unevenness of the characteristic.

The practical value of the proposed solutions consists in the ability to simulate the operation of the solar battery in various conditions based on experimental studies and using the Matlab computer system.

Key words: solar energy, solar cells, generated energy, tilt angle, azimuth, orientation optimization.

REFERENCES

1. Al-Shahri Omar A., Ismail Firas B., Hannan M.A. et al. Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 284, 125465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125465>
2. Myeongchan Oh, Hyeong-Dong Park. Optimization of solar panel orientation considering temporal volatility and scenario-based photovoltaic potential: A case study in Seoul national university. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 17, 3262. <https://doi.org/10.3390/en12173262>
3. Naraghi M. H., Atefi E. Optimum solar panel orientation and performance: A climatic data-driven metaheuristic approach. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 2, 624. <https://doi.org/10.3390/en15020624>
4. Masili M., Ventura L. Local tilt optimization of photovoltaic solar panels for maximum radiation absorption. *International Journal of Photoenergy*, 2019, Article ID 3254780. <https://doi.org/10.1155/2019/3254780>
5. Yadav A. K., Chandel S.S. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 23, pp. 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.027>
6. Gi Yong Kim, Doo Sol Han, Zoonky Lee. Solar panel tilt angle optimization using machine learning model: A case study of Daegu city, South Korea. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 3. <https://doi.org/10.3390/en13030529>
7. Slipchenko N.I., Pysmenetskyi V.A., Frolov A.V. et al. [Experimental studies of the characteristics of the solar panel KV 150/24(12) in winter conditions]. *Bulletin of the NTU "KhPI"*, Kharkiv, 2011, no. 24, pp. 86–92. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/12877> (Rus)
8. Oltu O., Milea P.L., Dragulinescu M., Franti E. Solar panel energetic efficiency optimization method, based on a specific detector and orientation microsystem. *2007 IEEE International Semiconductor Conference*, Sinaia, Romania. <https://doi.org/10.1109/SMICND.2007.4519663>
9. Bifacial solar panels give increased power output potential. *DS New Energy*, Jun 18, 2019. URL: <https://www.dsnerg.com/info/bifacial-solar-panels-give-increased-power-out-36005894.html>
10. *vertical.solar*. URL: <https://vertical.solar>
11. Kazem H. A., Khatib T., Alwaeli A. A. K. Optimization of photovoltaic modules tilt angle for Oman. *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, Langkawi, Malaysia, 2013, pp. 703–707, <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564637>
12. Yefimenko A.A., Logvinov O.V., Prisyazhniuk L.I. [Using full factorial experiment to simulate electricity generation by solar batteries]. *Technology and design in electronic equipment*, 2022, №4–6, pp. 32–38. <https://doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.32> (Ukr)
13. Dyakonov V.P. *MATLAB. Polnyy samouchitel'* [MATLAB. Complete self-tutor]. M., DMK Press, 2012, 768 p. (Rus)
14. Paluszek M., Thomas S. *Practical MATLAB Deep Learning*. APress, 2020, 252 p.
15. Frolov V.A. *Analiz i optimizatsiya v prikladnykh zadachakh konstruirovaniya RES* [Analysis and optimization in applied tasks of electronic equipment design]. Kyiv, Vyshcha shkola, 1991, 310 p. (Rus)
16. Kohenderfer M., Wheeler T. *Algoritmy optimizatsii* [Optimisation algorithms]. M., Williams, 2020, 528 p. (Rus)