

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Карабецький Денис Петрович



УДК 004.896:621.311.243(043.3)

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ
ГІБРИДНИХ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів, Національного авіаційного університету Міністерства освіти та науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Синєглазов Віктор Михайлович,
завідувач кафедри авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів Національного авіаційного університету,
заслужений діяч науки і техніки України,
лауреат Державної премії України.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
Глазунов Микола Михайлович,
Інститут Кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,
провідний науковий співробітник відділу №120;

доктор технічних наук, доцент
Будько Василь Іванович,
Національний технічний університет України
«КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри відновлюваних джерел енергії
факультету електроенерготехніки та автоматики
Національного технічного університету України
«КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Захист відбудеться «23» вересня 2021 року о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.08 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, пр. Любомира Гузара 1, корп. 1, ауд. 1.001.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «18» серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.062.08
доктор технічних наук, професор



В. М. Шутко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з основних тенденцій останніх десятиліть є пошук і впровадження відновлюваних джерел енергії, в тому числі і сонячної енергії. Враховуючи, що цей вид енергії стає все більш привабливим і більш доступним з кожним роком, проблеми залежності від умов навколишнього середовища так само стають все більш актуальними. Так як окремі джерела енергії не в змозі забезпечити виконання вимог навантаження внаслідок невизначеності умов навколишнього середовища, слід розглядати гібридизацію системи, в сторону використання додаткових джерел енергії (в тому числі і резервних) в поєднанні з системами акумулювання енергії.

Гібридна сонячна енергетична система (ГСЕС) – система, яка використовує відновлювану енергію Сонця в комбінації з традиційними джерелами енергії (наприклад, дизель-генератори використовують дизельне паливо і в деяких випадках мають доступ до енергомережі для продажу і купівлі електричної енергії), а також із застосуванням системи акумулювання енергії. Дана система має ряд переваг, так як вона може використовуватися в незалежному режимі, що дозволяє впроваджувати її в місцях, де немає доступу до енергомережі, так і підвищувати загальну якість електроенергії при експлуатації у разі виникнення проблем на підстанціях в режимі з підключенням до енергомережі.

З метою підвищення ефективності вимагається застосування методів багатокритеріальної структурно-параметричної оптимізації з дотриманням набору технічних і економічних обмежень, що потребує більш детального вивчення, побудови моделей процесів, які протікають в елементах ГСЕС і розроблення системи автоматизованого проектування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконувалось відповідно до планів НДР, програм і договорів, що виконувались у Національному Авіаційному Університеті: НДР 996-ДБ15 «Інтегрована система автоматизованого проектування енергетичних установок для використання енергії вітру та Сонця» 2015-2016 р.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності гібридних сонячних енергетичних систем, так само як і її елементів, за рахунок створення системи автоматизованого проектування на основі використання інтелектуальних підходів, зокрема, методів багатокритеріальної оптимізації.

Основні завдання, які слід вирішити для досягнення мети роботи:

- визначити типову структуру гібридної сонячної енергетичної системи, включаючи сонячну енергетичну систему (сонячні панелі, перетворювачі постійного і змінного струму, система пошуку точки максимальної потужності), гібридну систему акумулювання енергії, мережеве джерело енергії, резервне джерело енергії (дизельний генератор);
- визначити структуру системи автоматизованого проектування гібридної сонячної енергетичної системи;

- розробити інтелектуальну підсистему автоматизованого проектування для визначення оптимальної структури ГСЕС і параметрів її елементів;
- визначити структуру і параметри блоку пошуку точки максимальної потужності на підставі використання методу мінного вибуху (Mine Blast Algorithm);
- визначити структуру і параметри блоку гібридної системи накопичення енергії на підставі використання генетичних алгоритмів;
- розробити систему автоматизованого проектування БПЛА на сонячній енергії;
- розробити підсистему імітаційних моделей ГСЕС і БПЛА на сонячній енергії.

Об'єкт дослідження – система автоматизованого проектування ГСЕС.

Предметом досліджень є методи, моделі і алгоритми, на основі яких відбувається енергетична і структурно-параметрична оптимізація ГСЕС.

Методи досліджень базуються на положеннях: теорії оптимізації, дискретної математики і лінійної алгебри, що дозволило провести структурно-параметричний синтез; теорії мета-евристичних алгоритмів, що дозволило провести пошук точки максимальної потужності в умовах часткового затінення; імітаційного та комп'ютерного моделювання, що дозволило підтвердити достовірність отриманих результатів, а так само виконати перевірку рішення при структурно-параметричній оптимізації;

Як засіб розв'язання поставлених завдань використовувалося математичне та комп'ютерне моделювання. У дослідженнях використовувались програмні пакети Matlab, Simulink, а також мова програмування Java.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблена система автоматизованого проектування ГСЕС, яка відрізняється від відомих тим, що дозволяє оптимізувати структуру і параметри ГСЕС на підставі використання методів багатокритеріальної оптимізації, що дає змогу мінімізувати вартість системи, дефіцит енергії для споживачів, забруднення навколишнього середовища та збільшити надійність.

2. Розроблений підхід (метод) оптимізації структури сонячної енергетичної системи (СЕС) для безпілотного літального апарату (БПЛА) на сонячній енергії до складу якої входить гібридна система акумуляування енергії, яка відрізняється від відомих тим, що до її складу входять акумуляторні батареї і суперконденсатори, параметри яких визначаються в результаті рішення оптимізаційної задачі, що дозволяє підвищити надійність, збільшити час польоту, збільшити пікову максимальну потужність енергетичної системи БПЛА.

3. Розроблено новий алгоритм (метод) відстеження точки максимальної потужності (*англ.* MPPT) який відрізняється від відомих тим, що для його реалізації використаний еволюційний алгоритм мінного вибуху (Mine Blast Algorithm), що дозволяє підвищити ефективність і швидкість знаходження точки максимальної потужності в умовах часткової затіненості.

4. Розроблена система імітаційних моделей елементів ГСЕС, яка відрізняється від відомих тим, що до її складу входять елементи СЕС (сонячні панелі, набір перетворювачів постійного та змінного струму), дизель-генератор,

гібридна система акумулювання енергії, енергомережа, що дозволяє перевірити результати проектування.

Наукові результати і висновки, отримані у дисертації, підкріплено порівняльними тестами результатів запропонованих методів з відомими.

Практичне значення отриманих результатів. На підставі розробленого математичного забезпечення: спроектована і побудована гібридна сонячна енергетична система на даху п'ятого корпусу НАУ, що дозволило перевірити ефективність системи автоматизованого проектування для побудови ГСЕС; розроблена і побудована сонячна енергетична система з поворотною платформою дозволяє підвищити ефективність відбору сонячної енергії на 30%; використання системи автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних на ДП «ВО Київприлад» дозволило оптимізувати структуру і параметри проєктованих відновлюваних систем, і тим самим скоротити вартість, збільшити надійність, скоротити дефіцит енергії та забруднення навколишнього середовища для споживачів (акт впровадження від 20.04.2021).

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які відносяться до захисту, отримані автором особисто. Низку робіт надруковано у співавторстві.

В [2, 6] здобувачем виконана постановка задачі структурно-параметричного синтезу ГСЕС. В [2, 3-5] розробка стратегії керування СЕС на поворотній платформі та її елементами. В [2, 14] здобувач розробив імітаційні моделі СЕС та її елементів. В [7, 9, 11] виконана постановка задачі пошуку точки максимальної потужності та виконано порівняльний аналіз методів пошуку. В [20] запропоновано підхід до пошуку точки максимальної потужності на основі мета-евристичного алгоритму мінного вибуху. В [8] здобувачем виконана постановка задачі структурно-параметричного синтезу ГСЕС. В [19] запропоновано генетичний алгоритм розв'язання задачі структурно-параметричного синтезу гібридної системи накопичення енергії. В [1, 10] здобувач запропонував критерій оптимізації БПЛА на сонячній енергії. В [2, 13, 15] здобувач розробив імітаційні моделі СЕС та її елементів. В [1, 12, 16-18] здобувач розробив імітаційні моделі енергетичної системи БПЛА та її елементів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися і обговорювалися на наступних міжнародних науково-технічних конференціях: 2nd, 3rd, 4th, 5th International Conference ACTUAL PROBLEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DEVELOPMENT (APUAVD) Kyiv, Ukraine (2013, 2015, 2017, 2019); 4th, 5th, 6th IEEE International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) Kyiv, Ukraine (2016, 2018, 2020); 8th EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS (ECRES) Istanbul, Turkey (24-25 Aug 2020).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття – у закордонному виданні ЕС та ОЕСР, 7 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, та 1 стаття у періодичному науковому фаховому виданні України, яка включена до SCOPUS та віднесена до 3-го

квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank), 11 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій (з них 11 включені до міжнародних наукометричних баз та SCOPUS).

Структура та обсяг роботи. Робота складається із анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списків використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 149 сторінок друкованого тексту, включаючи 60 рисунків, 20 таблиць, 83 використаних джерел, 2 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, виконано формулювання мети й завдання дисертації, визначено об'єкт та предмет дослідження, методологічні основи досліджень, описані основні наукові результати, новизна та практична цінність отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими програмами й темами, а також наведено відомості про публікації, апробацію, впровадження та структуру роботи.

Перший розділ дисертації присвячений використанню відновлюваної енергетики, застосуванню гібридних сонячних енергетичних систем та їх важливість. Зазначаються перелік проблем при проектуванні ГСЕС, у вирішенні яких може допомогти спеціалізована САПР. Надається огляд структури ГСЕС, а також огляд вже відомих систем проектування ГСЕС та їх порівняння.

Другий розділ присвячений розробці автоматизованої системи проектування (САПР) ГСЕС. Основними критеріями при проектуванні ГСЕС будуть використовуватися вартість системи, як основний економічний критерій, кількість викидів CO₂ дизель-генератором і величина використання непоновлюваної енергії, як екологічні критерії, наявність дефіциту енергії, як критерій надійності, при якому ГСЕС повинен задовольнити вимоги навантаження системи.

Необхідно розробити ГСЕС включаючи: склад системи та параметри її елементів, визначити оптимальні складові (підсистеми), включаючи визначення складу та параметри її елементів оптимальні, в сенсі, наведених вище критеріїв.

Система автоматизованого проектування включає рішення наступних задач:

- оптимальний вибір структури ГСЕС: вибір критеріїв оптимізації, формування обмежень, розробка алгоритму оптимізації багатокритеріального;
- автоматизоване проектування системи перетворення сонячної енергії в електричну: визначення типу та кількості сонячних панелей, визначення кута установки панелей, розробка імітаційних моделей;
- автоматизоване проектування блоку перетворювачів: оптимальний вибір типу і кількості перетворювачів постійного струму, вибір типу підключення, оптимальний тип і схеми підключення інверторів, розробка імітаційних моделей;

- автоматизоване проектування блоку пошуку точки максимальної потужності (*англ.* MPPT): розробка алгоритму пошуку, вибір комплексу технічних засобів, імітаційне моделювання;
- автоматизоване проектування системи акумулювання енергії: розробка структури, розробка блоку батарей, розробка блоку суперконденсаторів, розробка блоку управління перемиканням;
- підсистема керування дизельним генератором: вибір комплексу технічних засобів, імітаційне моделювання;
- підсистема моделювання гібридної СЕС.

До САПР входять наступний набір математичних моделей: СЕС (сонячні панелі, перетворювачі постійного струму, перетворювачі змінного струму), дизельний генератор, гібридна система акумулювання енергії.

Гібридна система акумулювання енергії (HESS) поєднує переваги двох або більше технологій акумулювання енергії, які пом'якшують недоліки один одного.

При перевищенні потужності навантаженням, накопичувач енергії, за наявності запасів, може віддати частину або всю свою енергію в силову шину, забезпечивши тимчасове підвищення максимальної потужності. Даний режим, дозволить на певний інтервал часу, збільшити вихідну потужність ГСЕС, за рахунок миттєвої потужності сонячних панелей і потужності накопичувача.

При недостатній потужності навантаження, в силовій шині ГСЕС утворюється вільна енергія, яка не може бути використана в поточний момент. При цьому, можна стверджувати, що сонячні панелі, які є по суті генератором енергії, працюють не на повну потужність. Для того, щоб утилізувати всю максимальну потужність, залишок енергії можна акумулювати. Це забезпечить максимально ефективну експлуатацію ГСЕС в робочий час, коли сонячні панелі виступають основним генератором енергії.

При коливаннях потужності навантаження. У даному режимі експлуатації, накопичувач енергії може виступати як стабілізатор силової шини, для забезпечення достатньої потужності. Цей підхід є комбінацією першого і другого режиму використання.

Враховуючи дані трьох режимів використання, можна виділити проблеми, які можливі при експлуатації СЕС з модулем накопичувача енергії: утилізація енергії, коли потужність генерації перевищує потужність навантаження, підтримка вихідної потужності, при коливаннях потужності генерації, в наслідок тимчасового перевищення потужності споживачем (пікові навантаження), а так само при несподіваній зміні умов навколишнього середовища або роботи в нічний час.

Структура гібридної системи акумулювання енергії на основі суперконденсаторів та акумуляторних батарей представлена на рис. 1 складається з трьох основних підсистем: елементи акумулювання енергії, які включають в себе набір суперконденсаторів і акумуляторних батарей (N_{sc} і N_{bat} відповідно); набір двонаправлених перетворювачів постійного струму, що виконують функцію узгодження характеристик змінного струму з шиною

споживачів, а так само, можуть виконувати балансування і розподіл енергії та потужності заряду і розряду елементів живлення; система управління, відповідає за зчитування стану елементів акумулювання енергії, оцінку миттєвих енергетичних вимог до HESS, а так само прийняття рішень по заряду і розряду елементів, розподілу потужності і балансування енергії.



Рисунок 1 – Структура HESS

Завдання управління енергоспоживанням полягає у підвищенні ефективності роботи системи, продовження терміну служби елементів, задоволенні потреби навантаження, а так само підтримку заряду системи в дозволених межах. Коректна система управління повинна знайти оптимальний компроміс між цими завданнями.

У третьому розділі розглядається підходи збільшення продуктивності ГСЕС, так як з одного боку при оптимізації необхідно враховувати одночасно безліч критеріїв, а з іншого так само оптимально виконувати управління системою, в тому числі, з використанням алгоритму пошуку точки максимальної потужності

Пропонується оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи з використанням багатокритеріальної оптимізації. Виконується пошук оптимальної конфігурації сонячних панелей, акумуляторів і дизельних генераторів, щоб забезпечити мінімізацію вартості системи, використання палива, а також збільшення надійності і фактору застосування відновлюваних джерел енергії. Для ефективного вирішення цієї задачі пропонується використання еволюційних алгоритмів, використовуючи які ефективно визначається набір Парето-оптимальних конфігурацій станції, використовуючи які в подальшому аналізі можливо знайти найбільш задовільну конфігурацію.

Відповідно при використанні багатокритеріальної оптимізації, всі чотири цілі повинні бути мінімізовані:

$$\text{minimize } (C_{ГСЭС}, E_{ДГ}, E_{д}, E_{NRE}), \quad (1)$$

з урахуванням накладених обмежень на елементи ГСЕС:

$$S_{min} \leq S_{АКБ}(t) \leq S_{max}, \quad (2)$$

$$|P_{АКБ}(t)| \leq P_{АКБ,зар}, \quad (3)$$

$$|P_{АКБ}(t)| \leq P_{АКБ,разр}, \quad (4)$$

$$P_{ДГ}(t) \leq P_{ДГ,н}, \quad (5)$$

$$C_{эл}(t) \leq C_{эл}^{max}, \quad (6)$$

(2) – стан заряду системи акумулювання повинен бути в заданих межах; (3) та (4) – обмеження потужності системи акумулювання; (5) – обмеження потужності дизельного генератора; (6) – прийнятність тарифу при купівлі електроенергії з енергосистеми (наприклад день-ніч).

Вартість системи – визначається як сума всіх витрат на закупівлю елементів ГСЕС, їх установку, обслуговування, вартість використаних непоновлюваних ресурсів під час експлуатації системи:

$$C_{\text{ГСЕС}} = C_{\text{елем}} + C_{\text{обсл}} + C_{\text{палив}} + C_{\text{ес}}, \quad (7)$$

де $C_{\text{елем}}$ – вартість елементів ГСЕС; $C_{\text{обсл}}$ – вартість обслуговування і заміни елементів; $C_{\text{палив}}$ – вартість палива; $C_{\text{ес}}$ – вартість роботи з енергомережою.

Вартість елементів системи:

$$C_{\text{ел}} = N_{\text{СП}} C_{\text{СП}} + N_{\text{ДГ}} C_{\text{ДГ}} + N_{\text{АКБ}} C_{\text{АКБ}} + C_{\text{доп}}, \quad (8)$$

де $N_{\text{СП}}$, $Z_{\text{СП}}$ – кількість і вартість сонячних панелей; $N_{\text{ДГ}}$, $Z_{\text{ДГ}}$ – кількість і вартість дизельних генераторів; $N_{\text{АКБ}}$ і $Z_{\text{АКБ}}$ – кількість і вартість акумуляторів; $Z_{\text{двп}}$ – вартість допоміжного обладнання (перетворювачі постійного струму, інвертори тощо).

Вартість палива, необхідного для роботи дизельного генератора визначається у вигляді:

$$C_{\text{палив}} = \sum_t D_{\text{T}}(t) C_{\text{T}}^{\text{л}}, \quad (9)$$

де $D_{\text{T}}(t)$ – витрата палива за період часу t ; $c_{\text{T}}^{\text{л}}$ – вартість палива.

Нормальна робота ГСЕС залежить від терміну служби сонячних панелей і передбачає обслуговування (періодичну контактну чистку панелей від бруду). У разі виходу з ладу – заміна обладнання, що вимагає додаткових витрат.

Вартість роботи з мережею – це загальна вартість купівлі-продажу електроенергії з урахуванням обмежень прийнятності тарифу і тарифних зон:

$$C_{\text{ел}} = \sum_t C_{\text{ел}}(t) \quad (10)$$

$$C_{\text{эл}}(t) = \begin{cases} C_{\text{эл}}^{\text{T1}} E_{\text{эс}}(t) & P_{\text{д}}(t) > 0, \quad t \in T_{\text{T1}} \\ C_{\text{эл}}^{\text{T2}} E_{\text{эс}}(t) & P_{\text{д}}(t) > 0, \quad t \in T_{\text{T2}}, \\ C_{\text{эл}}^{\text{T3}} E_{\text{эс}}(t) & P_{\text{д}}(t) < 0, \end{cases} \quad (11)$$

де $Z_{\text{ел}}(t)$, $E_{\text{ес}}(t)$ – вартість і обсяг електроенергії за проміжок часу t ; $C_{\text{эл}}^{\text{T1}}$, $C_{\text{эл}}^{\text{T2}}$, $C_{\text{эл}}^{\text{T3}}$ – тарифи покупки (двоступенчата тарифікація Т1 – день, Т2 – ніч) і продажу електроенергії (Т3 – зелений тариф); $P_{\text{д}}(t)$ – дефіцит потужності.

Вартість обслуговування і заміни елементів:

$$C_{\text{обсл}} = \sum_t \sum_i C_{\text{обсл},i}(t), \quad (12)$$

де $C_{\text{обсл},i}$ – вартість обслуговування елемента ГСЕС протягом заданого часу t .

Екологічний критерій може бути розрахований на основі викидів залишків робочого палива з ДГ. Викиди CO_2 є одним з екологічних критеріїв, пов'язаних з роботою резервного джерела живлення дизельного генератора. Кількість

викидів розраховується наступним чином:

$$CO_{2\text{зем}} = \sum_t P_{\text{ДГ}}(t)K, \quad (13)$$

де K – коефіцієнт викидів (г/кВт); $P_{\text{ДГ}}$ – потужність (Вт) дизельного генератора в момент часу t .

Ще одним екологічним критерієм, є кількість використаної непоновлюваної енергії, це – енергія, отримана з мережі, а також при використанні дизельного генератора(ів):

$$E_{\text{NRE}} = \sum_t E_{\text{ec}}^+(t) + E_{\text{ДГ}}(t), \quad (14)$$

де E_{ec}^+ – куплена електроенергія з мережі; $E_{\text{ДГ}}$ – енергія, що виробляється дизельними генераторами.

Надійність електропостачання споживачів відіграє життєво важливу роль в наслідок того, що поновлювані джерела енергії не є постійними за своєю природою. Відповідно, при підключенні ГСЕС до енергетичної мережі споживача, технічної метою буде є мінімізація дефіциту енергії. Дефіцит енергії – критерій, який використовується для вимірювання надійності системи, який вимірює величину дефіциту енергії за весь період експлуатації:

$$E_{\text{д}} = \sum_t E_{\text{н}}(t) - E_{\text{дост}}(t),$$

де $E_{\text{н}}$ – енергія, необхідна споживачам (навантаження); $E_{\text{дост}}$ – енергія, що доступна в ГСЕС, забезпечується системою акумулювання енергії, СЕС і ДГ.

Сонячні панелі широко використовуються завдяки своїй безпеці і відсутності забруднення навколишнього середовища. Припускаючи, що фотоелектричний масив об'єднує N_s панелей послідовно і N_p паралельно, максимальна вихідна потужність може бути розрахована як:

$$P_{\text{СП}}(t) = N_s N_p P_{\text{СП,СУВ}} f_{\text{СП}} \frac{G(t)}{G_{\text{СУВ}}} (1 + K_{\text{ТР}}(T_c(t) - T_{\text{C,СУВ}})), \quad (15)$$

де $P_{\text{СП,СУВ}}$ – потужність при стандартних умовах випробувань (СУВ) згідно специфікації сонячних панелей; $f_{\text{СП}}$ – коефіцієнт втрат потужності, який включає коефіцієнти втрат потужності за умови забруднення панелей, умов часткового затінення тощо; $K_{\text{ТР}}$ – температурний коефіцієнт зміни потужності (характеристики панелі); $T_c(t)$ – поточна температура сонячних панелей; $T_{\text{C,СУВ}}$ – температура на СУВ (25°C); $G(t)$ – поточна сонячна радіація; $G_{\text{СУВ}}$ – константа сонячна радіація при СУВ.

Модель навколишнього середовища

Оскільки при моделюванні експлуатації сонячних панелей потрібна наявність значень сонячного випромінювання і температури навколишнього середовища в заданий момент часу, передбачається використання моделі, що включає в себе заданий часовий ряд, обмежений часом життя системи. Так само, ці дані можуть бути згенеровані синтетично.

Система акумулювання енергії

Акумуляторні батареї (АКБ) часто застосовуються в ГСЕС в якості накопичувального елемента. Кількість електричного заряду і розряду залежить не тільки від навантаження, але і від стану заряду (*англ.* SOC). SOC під час моделювання розраховується за допомогою формули:

$$S_{\text{АКБ}}(t) = S_{\text{АКБ}}(t - 1) + \frac{E_{\text{АКБ}}(t)}{N_{\text{АКБ}}C_{\text{АКБ}}U_{\text{АКБ}}} \eta_{\text{АКБ}}, \quad (16)$$

де $E_{\text{АКБ}}(t)$ – потік енергії в/з акумулятора (позитивний при зарядці і негативний при розрядці); $\eta_{\text{АКБ}}$ – ефективність заряду/розряду; $N_{\text{АКБ}}$ – кількість АКБ; $C_{\text{АКБ}}$ – ємність кожного АКБ; $U_{\text{АКБ}}$ – напруга акумулятора.

Модель батареї зберігає значення SOC між нижньою межею (S_{min}) і верхньою межею (S_{max}), щоб забезпечити безпечну роботу і термін служби батареї.

Дизельний генератор зазвичай діє як резервне джерело енергії, і його витрата палива D_m визначається як:

$$D_T(t) = (\alpha P_{\text{ДГ}}(t) + \beta P_{\text{ДГ,н}}) N_{\text{ДГ}}, \quad (17)$$

де $P_{\text{ДГ,н}}$ і $P_{\text{ДГ}}(t)$ – номінальна та фактична потужність; α і β – коефіцієнти витрати палива, $N_{\text{ДГ}}$ – кількість дизельних генераторів.

Модель навантаження

Як і у випадку температури навколишнього середовища, а також сонячного випромінювання, дані про навантаження можуть бути тимчасовими рядами, обмеженими терміном служби системи. Також можливо, що часові ряди будуть згенеровані програмним шляхом, використовуючи інструмент Artificial Load Profile Generator (ALPG), розроблений Університетом Твенте.

Для вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації застосовувався алгоритм NSGA-II. В набір вхідних параметрів для етапу оптимізації входить інформація про вартість і обслуговування елементів ГСЕС (табл. 1), конфігураційні параметри елементів ГСЕС (табл. 2), а так само часові ряди про доступне сонячне випромінювання (рис. 2), температура навколишнього середовища (рис. 3), очікування по навантаженню (рис. 4).

Таблиця 1

Інформація о вартості елементів гібридної сонячної енергетичної системи

Елемент	Вартість (шт.)	Технічне обслуговування (за місяць)
Сонячні батареї	200	5
Акумулятори	100	10
Дизель-генератор	800	20
Конвертер	300	10
Інвертор	350	10

Таблиця 2

Параметри конфігурації елементів гібридної сонячної енергетичної системи

Параметр	Значення
Параметри СЕС	
Коефіцієнт втрат потужності ($f_{\text{сп}}$)	0,85
Потужність панелі при СУВ ($P_{\text{сп,сув}}$)	320 Вт

Температурний коефіцієнт зміни потужності (K_{TP})	-0,35 %/°C
Параметри САЕ	
Ємність АКБ (Z_{AKB})	225Ач
Напруга на акумуляторі (U_{AKB})	12 В
ККД перетворення системи акумуляювання енергії (η_{AKB})	0,98
Мінімальний рівень СЗ (S_{min})	10%
Максимальний рівень СЗ (S_{max})	95 %
Параметри ДГ	
Номінальна потужність дизельного генератора ($P_{ДГ,н}$)	1000Вт
Коефіцієнт витрати палива (α)	0,08
Коефіцієнт витрати палива (β)	0,25
Коефіцієнт викидів дизельного генератора (K_{CO_2})	2,8
Ціна дизельного палива ($Z_{топл}$)	1 %/л
Параметри електросеті	
Купівля електроенергії, денний тариф ($C_{эл}^{T1}$)	0,062\$/кВтг
Купівля електроенергії, нічний тариф ($C_{эл}^{T2}$)	0,031\$/кВтг
Купівля електроенергії, максимальна ціна ($C_{эл}^{max}$)	0,04\$/кВтг
Продаж електроенергії, зелений тарифу ($C_{эл}^{T3}$)	0,15\$/кВтг
Параметри моделювання	
Моделювання часу (T)	8760 г
Крок моделювання (Δt)	1 p

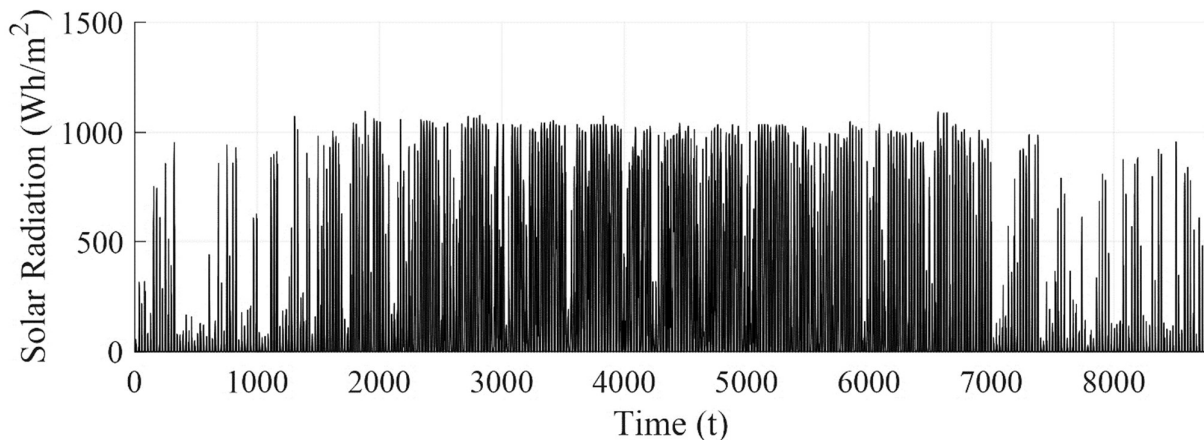


Рисунок 2 – Доступне сонячне випромінювання протягом 1 року

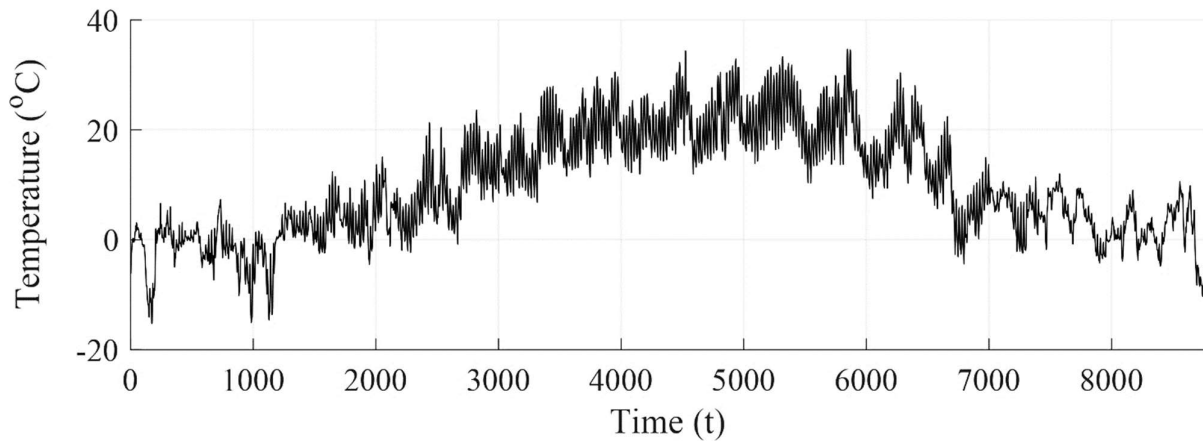
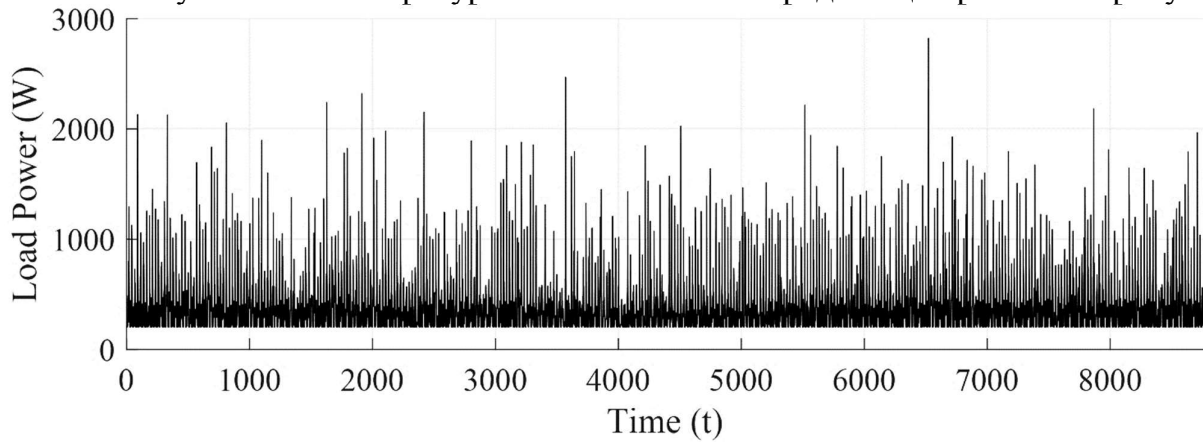


Рисунок 3 – Температура навколишнього середовища протягом 1 року

Рисунок 4 – Миттєва потужність навантаження протягом 1 року
Виконавши оптимізацію знайдені рішення показані в таблиці 3:

Таблиця 3

Результати структурної оптимізації ГСЕС

$N_{СП}$	$N_{АКБ}$	$N_{ДГ}$	$C_{ГСЭС}$	$EM_{ДГ}$	E_{∂}	E_{NRE}
Автономний режим						
19	7	2	15780	950	0	339470
Мережевий режим ($C_{ел}^{max} = 1\\$/кВтг$)						
14	6	0	8523	0	0	483924
Мережевий режим ($C_{ел}^{max} = 0.04\\$/кВтг$)						
4	1	2	7726	4935	1773	1762618

Так як для кожного набору змінних під час оптимізації проводиться моделювання року роботи, на рис. 5-7 відображені результати роботи кожної з підсистем. Так само слід зазначити, що для режиму з підключенням до енергомережі присутність дизельного генератора не обов'язкова, у зв'язку з цим він не задіяний.

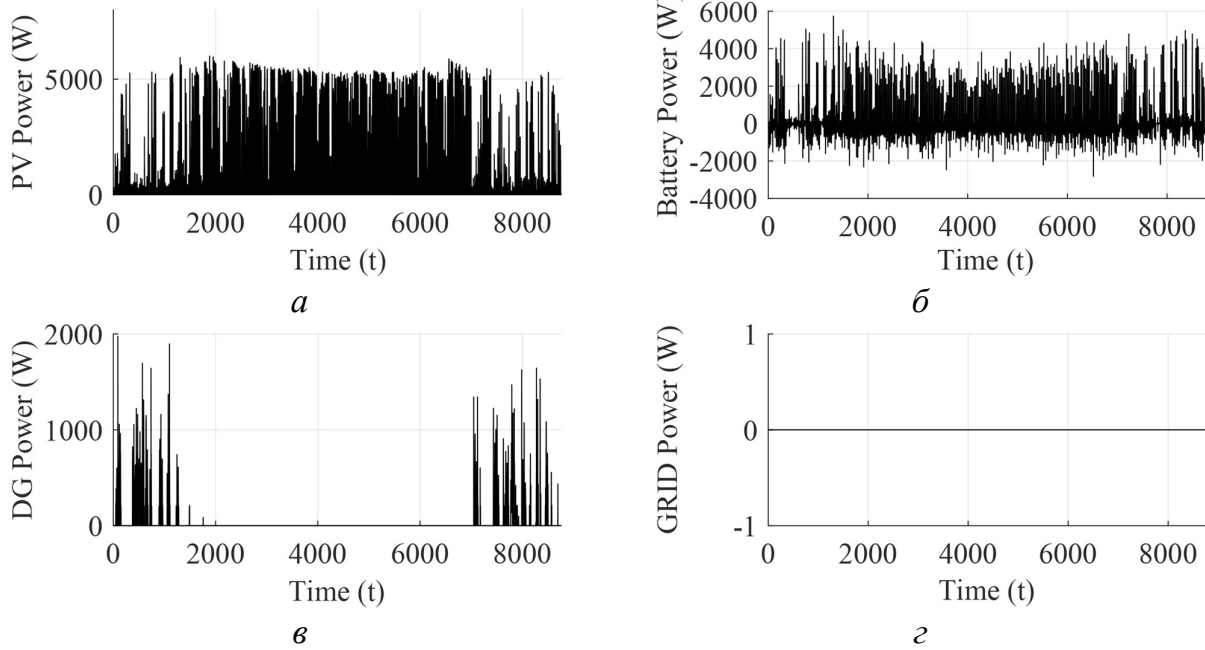


Рисунок 5 – Моделювання року роботи гібридної сонячної енергетичної системи (запропоноване рішення в незалежному режимі): *а* – потужність сонячної енергетичної системи; *б* – потужність системи акумулювання енергії; *в* – фактична потужність дизельного генератора; *г* – потужність взаємодії з електромережею

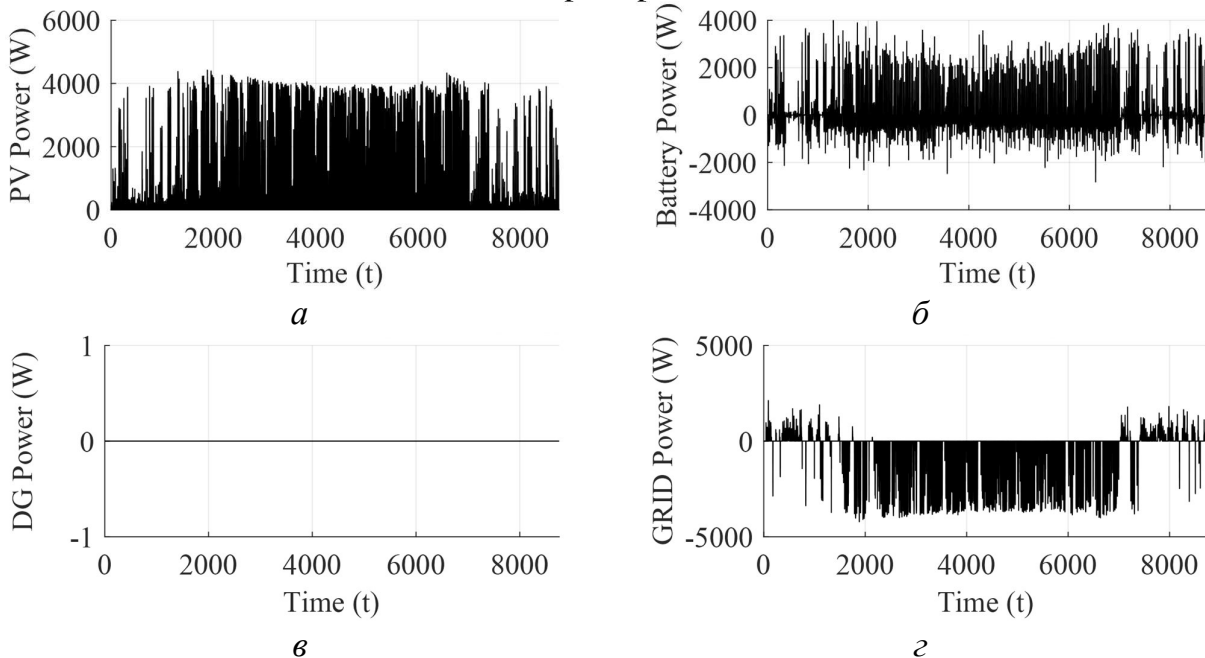


Рисунок 6 – Моделювання року роботи гібридної сонячної енергетичної системи (запропоноване рішення в мережевому режимі без обмежень на купівлю електроенергії): *а* – потужність сонячної енергетичної системи; *б* – потужність системи акумулювання енергії; *в* – фактична потужність дизельного генератора; *г* – потужність взаємодії з електромережею

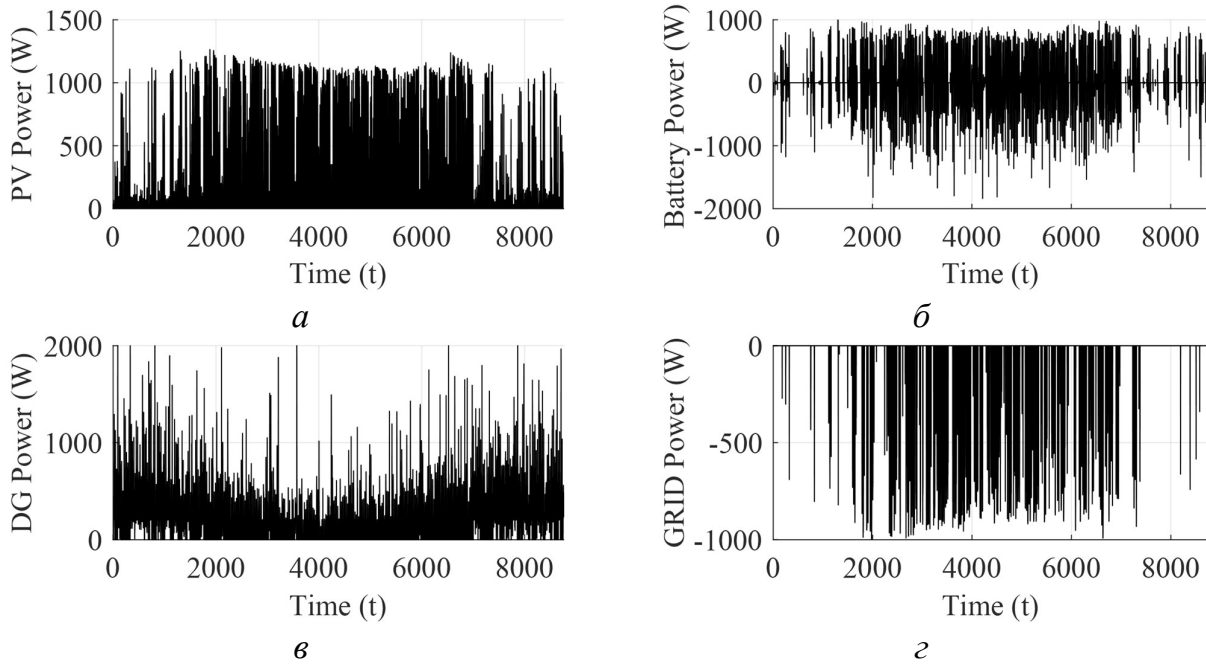


Рисунок 7 – Моделювання року роботи гібридної сонячної енергетичної системи (запропоноване рішення в мережевому режимі з обмеженням на купівлю електроенергії за денним тарифом): *a* – потужність сонячної енергетичної системи; *б* – потужність системи акумулювання енергії; *в* – фактична потужність дизельного генератора; *г* – потужність взаємодії з електромережею

Відстеження точки максимальної потужності в умовах часткового затінення з використанням нового удосконаленого алгоритму мінного вибуху

Вихідна потужність будь сонячної панелі залежить від багатьох параметрів: умов навколишнього середовища, рівня сонячного випромінювання, температури сонячних панелей, підключеного навантаження.

У зв'язку з тим, що MPP може переміщатися по кривій потужності в різні моменти часу і роботи системи, через залежності від змінних середовища, для його пошуку в реальному часі повинні застосовуватися алгоритми MRPT.

Під час PSC вихідна потужність може помітно знизитися. Крім того, ці умови можуть чинити фізичний вплив на фотоелементи, наприклад, створення гарячих точок на модулях, тому при об'єднанні осередків в модулі / панелі виробники використовують байпасні діоди. Ці гарячі точки починають з'являтися після втрати потужності клітинки або погіршення в конфігураціях, підключених до ланцюжку. Тому що кожна клітинка в колоні повинна підтримувати постійний струм і частину втраченої енергії, що виділяється у вигляді тепла. Для усунення цих ефектів використовуються пасивні і активні методи.

Активним методом пом'якшення впливу PSC є так звана динамічна реконфігурація масиву PV. Для пасивного методу кожна комірка (в ідеалі) повинна мати зворотне зміщення з допомогою обхідного діода, який відключить затінену або пошкоджену клітинку і врятує клітинку від руйнівних

впливів. Але цим методом неможливо повністю уникнути втрат потужності, тому на кривій PV будуть спостерігатися кілька типів піків (рис. 8): локальні і глобальні точки максимальної потужності (LMPP і GMPP). Більшість традиційних алгоритмів MPPT не можуть точно відстежувати GMPP.

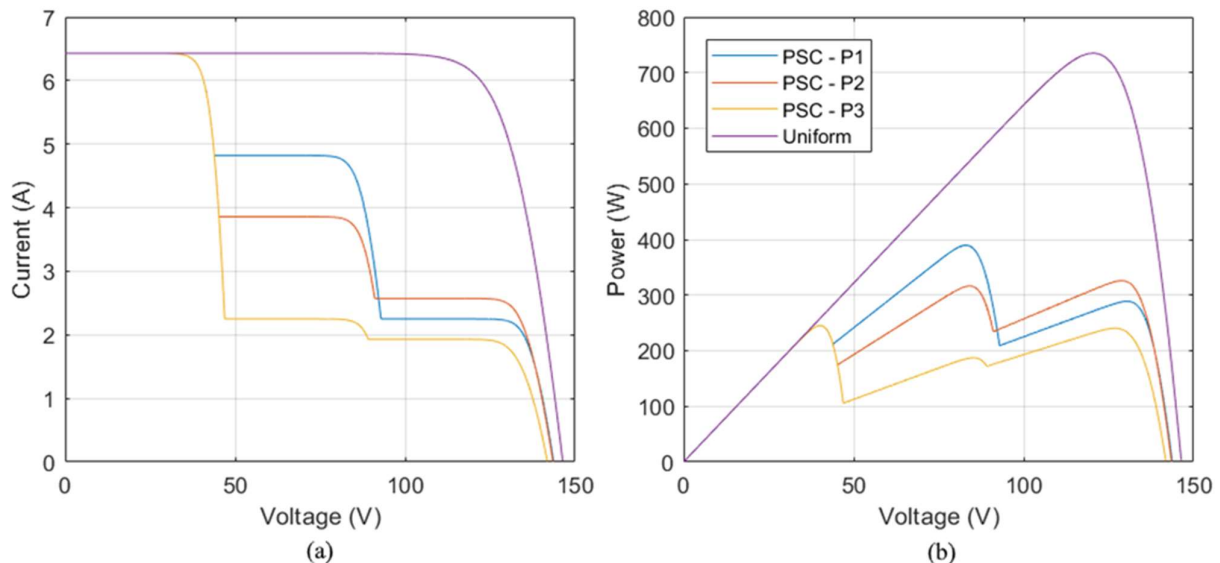


Рисунок 8 – Характеристики сонячних панелей при STC в умовах часткового затінення.

Алгоритм мінного вибуху використовується для вирішення великої різноманітності задач з обмеженнями, основне завдання якого – скоротити час обчислень, підвищити точність і використовувати менше параметрів.

Ідея алгоритму полягає в тому, що прийнята концепція вибуху міни в реальному світі, шрапнель від вибуху летить у різних напрямках, з різною швидкістю, на різні відстані і час, що призводить до подальшого вибуху в певній зоні. Це зіткнення приводить нас до виявлення найбільш вибухонебезпечної міни, що можна розглядати як відповідність цільової функції в місці розташування міни.

Імітаційне моделювання пошуку точки максимальної потужності з використанням алгоритму мінного вибуху.

Щоб оцінити характеристики пропонованого методу MPPT з використанням алгоритму ІМВА, моделювання було виконано в середовищі Simulink.

Таблиця 4

Параметри імітаційної моделі фотоелектричної підсистеми

Параметр	Значення
Сонячна панель	
Максимальна потужність (STC)	245W
Напруга при максимальній потужності	40.5 V
Сила струму при максимальній потужності	6.05 A
Напруга (розімкнений ланцюг)	48.8 V
Сила струму (КЗ)	6.43 A
Конфігурація модулів	72S1P

Температурний коефіцієнт струму КЗ	0.05%/C
Масив сонячних панелей	
конфігурація	3S1P
PSC шаблон 1	[700 1000 350]
PSC шаблон 2	[400 1000 600]
PSC шаблон 3	[1000 350 300]
PSC шаблон Uniform	[1000 1000 1000]

Характеристики фотоелектричних модулів показано на рисунку 8, параметри однієї фотоелектричної панелі наведені в таблиці 4, для моделювання ефекту умов часткового затінення були обрані три еквівалента сонячних панелей SunPower E20-245, з'єднаних послідовно з індивідуальними коефіцієнтами затінення при введення кожного з PV-модулів в масив, а також різні шаблони PSC. Параметри фотоелектричної підсистеми вказані в таблиці 4.

Щоб проілюструвати ефект умов часткового затінення, ми обрали три різних шаблони: Uniform – найпростіший зразок, який використовується для ілюстрації поведінки MPPT без PSC; PSC шаблон 1 – цей шаблон використовується як хороший сценарій PSC, де крива PV має 3 піки з помітним GMPP; PSC шаблон 2 – цей шаблон використовується у випадку, коли GMPP і найближчий по потужності LMPP близькі; Схема PSC 3 – ця модель використовується у випадку, коли GMPP і близький за номінальної потужності LMPP мають великий розкид на кривій PV.

У таблиці 5 і 6 показано параметри моделювання, які використовувалися при моделюванні алгоритму PSO та алгоритму IMBA в підсистемі MPPT, ці значення були отримані при калібруванні алгоритмів для даного середовища моделювання.

Таблиця 5
Параметри моделювання алгоритму PSO MPPT

Параметр	Значення
Число частинок	4
Мінімальний робочий цикл	0,01
Максимальний робочий цикл	0,99
Час вибірки	0,1 с
Максимальна ітерація	13
Інерційний вага	0,3
Коефіцієнт прискорення 1	1,2
Коефіцієнт прискорення 2	2

Таблиця 6
Параметри моделювання алгоритму IMBA MPPT

Параметр	Значення
Кількість осколків	3
Мінімальний робочий цикл	0,01
Максимальний робочий цикл	0,99
Час вибірки	0,1 с
Максимальна ітерація	15

Коефіцієнт зменшення	3
Фактор дослідження	40

На рисунку 9 показана фактична потужність сонячних панелей при використанні двох алгоритмів визначення максимальної потужності: PSO і МВА. Це моделювання було виконано для фіксованого початкового числа ГВЧ в Simulink, щоб мінімізувати вплив випадкових чисел на різні шаблони PSC.

Результати показують, що ці алгоритми відмінно справляються із завданням відстеження, здатні визначати правильну точку максимальної потужності, а також переходити у стабільний стан в кінці пошуку, використовуючи найкраще рішення протягом інтервалу часу пошуку. МВА може забезпечити високу ефективність відстеження при виявленні GMPP, яка перевищує 98,11% в гіршому випадку і 99,53% в середньому через фази експлуатації, що надзвичайно ефективно для завершення після фази розвідки. Фаза дослідження використовується для максимально можливого виявлення LMPP, коли експлуатація використовується для підвищення точності відстеження.

Детальні результати цього моделювання показано в таблиці 7, яка включає порівняння показників продуктивності, засноване на двох основних порівняльних характеристиках: ефективність відстеження, втрати потужності.

Ефективність відстеження в цілому означає, наскільки близько відстежується GMPP до реального GMPP, виміряному у тих же умовах на основі PV-криву масиву PV, можна розрахувати наступним чином:

$$\eta_{tracking} = \frac{P_{GMPP}^{Algo}}{P_{GMPP}^{Array}} \quad (18)$$

Коефіцієнт втрат потужності в цілому означає скільки енергії втрачається через алгоритм поведінки MPPT на обраному часовому інтервалі, можна розрахувати наступним чином:

$$CP_{loss}^{Algo} = 1 - \frac{\int_{t_{start}}^{t_{end}} P(t) dt}{P_{GMPP}^{Array}} \quad (19)$$

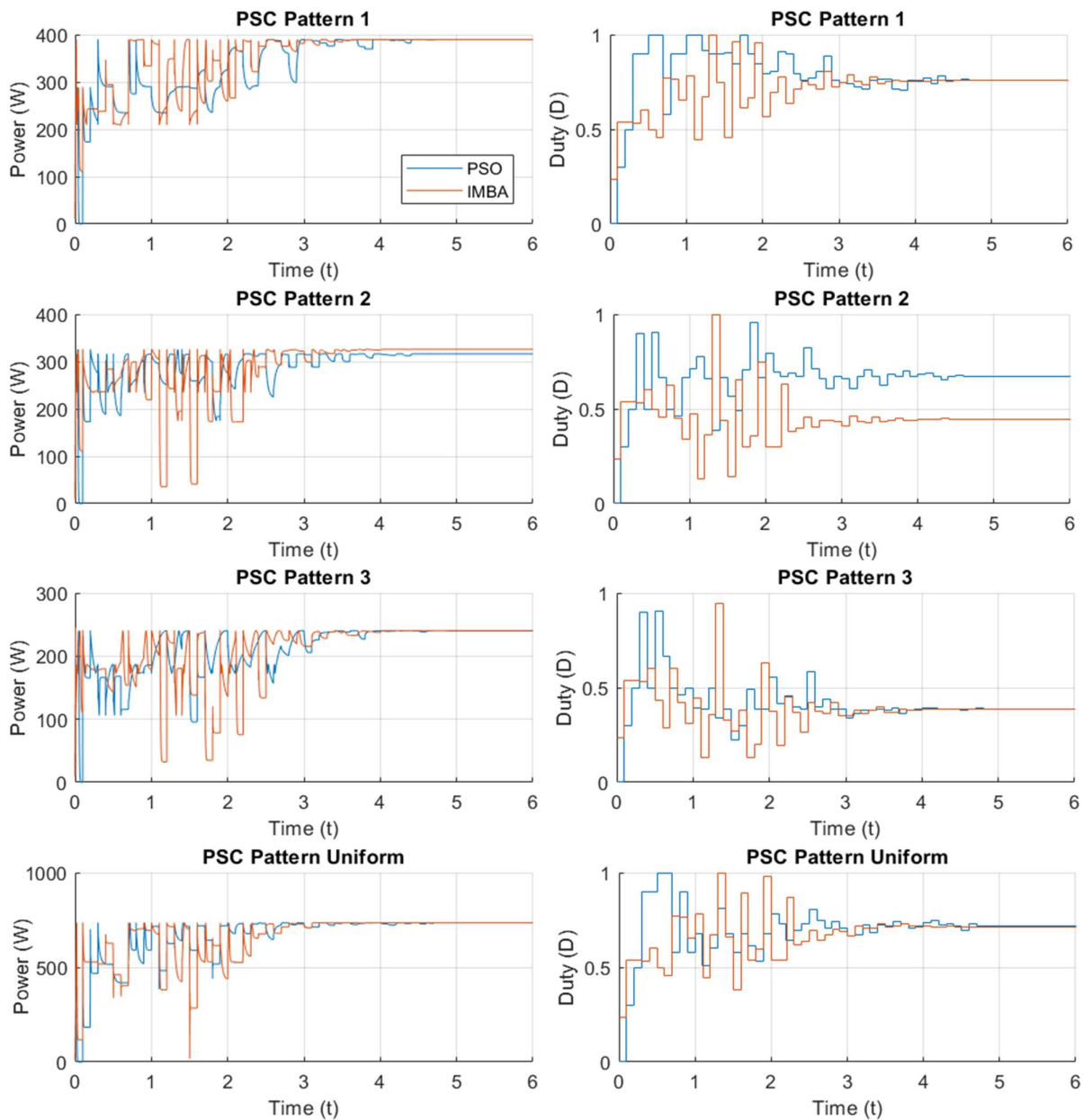


Рисунок 9 – Моделювання відстеження точки максимальної потужності для алгоритмів PSO і MBA.

Таблиця 7

Результат моделювання: порівняння алгоритмів відстеження MBA і PSO.

Характеристика	шаблон	ПСО	МБА
Відстеження ефективності			
	PSC шаблон 1	389,5841(99,9999%)	389,5869 (99,9999%)
	PSC шаблон 2	316,3036 (97,0805%)	325,8123 (99,9990%)
	PSC шаблон 3	239,8583 (97,9157%)	240,3435 (98,1138%)
	PSC Uniform	734,7486 (99,9602%)	735,0404 (99,9999%)
Втрата потужності			
	PSC шаблон 1	13,3900%	11.1067%
	PSC шаблон 2	12,6430%	12,1267%

	PSC шаблон 3	15,8981%	15,6692%
	PSC Uniform	9,8345%	11,4038%

Запропонований алгоритм MPPT здатний визначати належний GMPP, а також переходить у стабільний стан по набору критеріїв збіжності. Його порівнювали з одним з найпопулярніших методів MPPT – PSO. Це моделювання показує наступні результати: обидва вони можуть легко працювати під PSC і обидва відмінно впоралися з підвищенням ефективності виробництва фотоелектричної енергії з хорошим рівнем ефективності відстеження та відносно невеликим рейтингом втрат потужності через характер відстеження алгоритмів метаевристики і використання випадкових чисел під час ітерацій. Основною перевагою IMBA перед PSO є фаза експлуатації, яка використовується для отримання найкращого оптимізаційного рішення, результат якого чітко видно під час моделювання з тим же початковим значенням випадкових чисел. В якості основного моменту для поліпшення IMBA та підвищення його стабільності для відстеження істинного GMPP може бути введена додаткова фаза ініціалізації, яка може сканувати початкову область відстеження під час першої ітерації алгоритму, це мінімізує вплив генератора випадкових чисел на виявлення проміжних MPP.

Четвертий розділ присвячений оптимальному проектуванню безпілотних літальних апаратів, забезпечених сонячною енергетичною установкою і гібридною системою акумуляування енергії, що забезпечують максимально тривалий безпосадочний політ.

Наявність відновлюваного джерела енергії у вигляді сонячних панелей може значно збільшити час польоту по порівнянні з безпілотними літальними апаратами. У разі оптимальної конструкції літака і відповідних умов навколишнього середовища, можливо, що буде достатньо сонячної енергії для зарядки бортових акумуляторів, для того щоб потім використовувати накопичену енергію протягом нічного циклу польоту і подальшого виходу на денну фазу. Це так звана **можливість безперервного польоту**, при якому відбувається циклічне використання енергії, накопиченої в акумуляторах протягом нічного періоду часу і підзарядка протягом денного періоду.

БПЛА з СЕС є предметом досліджень досить тривалий час. На сьогоднішній день розроблено безліч легких БПЛА, основними дослідниками в цій області є лабораторія при ETHZ, Швейцарія.

Завдання розробки БПЛА на сонячних панелях охоплює багато областей проектування і розробки: проектування літального апарату (структура літака, аеродинаміка, механіка польоту); проектування бортових енергетичних систем (силова електроніка, електроживлення, сонячна енергетична установка); розробка навігаційного програмного забезпечення автопілота.

Проблеми виникають при проектуванні БПЛА: низькі енергетичні запаси не забезпечують стійкість до погіршення погодних умов; фактична відсутність корисного навантаження; висока складність експлуатації, низьке енергоспоживання і значна вага БПЛА призводить до млявої динаміки польоту; обмежена автономія без обізнаності про навколишнє середовище. Також місцеві погодні ефекти можуть швидко пошкодити літальний апарат

(наприклад, через пориви вітру, опадів чи грози) або знизити його характеристики (наприклад, через хмари)

Конструктивно БПЛА, як і звичайний літак складається з: фюзеляжу, крил і хвостового оперення, який оснащений силовою установкою, а також має певну схему компоновки.

Відповідно структурно сонячний БПЛА складається з: корпусу БПЛА з урахуванням схеми компоновки і профілю крила; СЕУ (сонячні панелі, АКБ, набір перетворювачів, МРРТ), що представляє енергетичну частину комплексу силової установки; рухова група (пропелер, електродвигун), що представляє частину комплексу силової установки для створення тяги; пілотажно-навігаційне обладнання (контролер польоту, БІНС); радіотехнічне обладнання; бортове обладнання сценарію експлуатації (корисне навантаження).

Побудова гібридних систем акумулювання енергії СЕС БПЛА

Завдання визначення розміру елементів накопичення HESS, полягає в тому, щоб знайти оптимальну кількість елементів HESS, а саме акумуляторних батарей (N_{bat}) і суперконденсаторів (N_{sc}), при умові мінімізації ваги, розміру або вартості HESS, а також задоволенні вимог навантаження, доступної потужності і обмежень елементів системи.

Існує взаємозалежність між проблемою управління енергоспоживанням HESS і розміром HESS, так як при різному розмірі елементів HESS розподіл потужності може бути визначено по-різному.

Завдання оптимізації розмірів HESS полягає в тому, щоб знайти оптимальну комбінацію (N_{bat}, N_{sc})

$$\text{minimize } f(N_{bat}, N_{sc}) \quad (20)$$

при обмеженнях

$$N_{bat} P_{bat}^{max} \geq P_{bat}(t), \quad (21)$$

$$N_{sc} P_{sc}^{max} \geq P_{sc}(t), \quad (22)$$

$$N_{bat} P_{bat,one} \geq P_{load}, \quad (23)$$

$$N_{bat} P_{bat,one} + N_{sc} P_{sc,one} \geq P_{load}^{max}, \quad (24)$$

$$N_{bat} E_{bat,one} + N_{sc} E_{sc,one} \geq E_{load}^{max}, \quad (25)$$

$$P_{sc}^{min} \leq P_{sc}(t) \leq P_{sc}^{max}, \quad (26)$$

$$P_{bat}^{min} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat}^{max}, \quad (27)$$

$$SOC_{bat}^{min} \leq SOC_{bat}(t) \leq SOC_{bat}^{max}, \quad (28)$$

$$SOC_{sc}^{min} \leq SOC_{sc}(t) \leq SOC_{sc}^{max}. \quad (29)$$

На кожному часовому кроці моделі навантаження $P_{load}(t)$ сума миттєвої потужності АКБ (P_{bat}) і суперконденсатора (P_{sc}) дорівнює споживаній потужності навантаження:

$$P_{load}(t) = P_{bat}(t) + P_{sc}(t) \quad (30)$$

У свою чергу миттєву потужність можливо виразити через енергії за момент часу:

$$P_{sc} = \frac{E_{sc}(t) - E_{sc}(k-1)}{\Delta T} \quad (31)$$

Зв'язок енергії з напругою:

$$E_{sc}(t) = \frac{CV_{sc}^2(t)}{2} \quad (32)$$

$$E_{sc}^{min} \leq E_{sc}(t) \leq E_{sc}^{max} \quad (33)$$

$$P_{sc}^{min}(t) \leq P_{sc}(t) \leq P_{sc}^{max}(t) \quad (34)$$

Максимальна потужність розряду/заряду може бути виражена наступним чином (максимальні струми розряду/заряду визначаються характеристиками):

$$P_{sc}^{min} = V_{sc} I_{sc}^{min} \quad (35)$$

$$P_{sc}^{max} = V_{sc} I_{sc}^{max} \quad (36)$$

Інструмент аналізу, розроблений в Simulink, використовує як вхідні параметри характеристики середовища польоту, часу запуску, а також параметри БПЛА. Моделювання виконується за рахунок трьох базових підсистем: модель інтенсивності сонячного випромінювання, модель енергосистеми, модель БПЛА.

Моделювання часу виконується з використанням 48-годинної часової шкали для перевірки можливої безперервної здібності польоту з докладним поданням всіх внутрішніх станів підсистем у обраному місці в Києві, Україна.

В результаті цей інструмент моделювання може створити «реальну» картину ефективності польоту та показати стан усіх систем БПЛА, аналізуючи які, ми могли б поліпшити деякі параметри дизайну або як ми можемо використовувати надлишкову потужність, котра може бути збережена шляхом збільшення висоти або може бути використана додатковими функціями корисного навантаження.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розглянута актуальна проблема проектування гібридних сонячних енергетичних систем та їх підсистем, які були теоретично та експериментально досліджені. Розроблені підходи, що забезпечують пошук оптимальної структури, застосування ефективних алгоритмів пошуку точки максимальної потужності сонячної підсистеми, а так само визначення оптимальної СЕС із застосуванням гібридної системи накопичення енергії для БПЛА на сонячній енергії, яка дає змогу збільшити тривалості польоту.

Основні досягнуті результати:

1. Розроблена структура системи та сама система автоматизованого проектування ГСЕС, що дозволяє оптимізувати структуру і параметри ГСЕС на підставі використання методів багатокритеріальної оптимізації, що дає змогу мінімізувати вартість системи, збільшити надійність, мінімізувати дефіцит енергії для споживачів, мінімізувати забруднення навколишнього середовища.

2. Розроблена структура СЕС для БПЛА на сонячній енергії до складу якої входить гібридна система акумуляування енергії (на базі акумуляторних батарей та суперконденсаторів), параметри яких визначаються в результаті рішення оптимізаційної задачі, що дозволяє підвищити надійність, збільшити час польоту, збільшити пікову максимальну потужність енергетичної системи БПЛА.

3. Розроблено новий алгоритм MRPT, для його реалізації використаний еволюційний метод Mine Blast Algorithm, що дозволяє підвищити ефективність

і швидкість знаходження точки максимальної потужності в умовах часткової затіненості.

4. Розроблена система імітаційних моделей елементів ГСЕС, до її складу входять СЕС (сонячні панелі, набір перетворювачів постійного та змінного струму), дизель-генератор, гібридна система акумулювання енергії, енергомережу, що дозволяє перевірити результати проектування.

5. Розроблену систему автоматизованого проектування ГСЕС впроваджено на ДП «ВО Київприлад» (акт впровадження від 20 квітня 2021), яка дозволила визначити оптимальну структуру ГСЕС для домогосподарства на двох осіб (м. Київ, Україна) та знизити оціночну вартість системи, в випадках можливості продажу електроенергії за зеленим тарифом, до 45%, при збереженні цілей надійності, не збільшуючи забрудненість навколишнього середовища та відсутності дефіциту. Також апробовано розроблену САПР ГСЕС на спроектованій і побудованій ГСЕС на даху п'ятого корпусу НАУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях іноземних держав-членів ЄС та ОЕСР:

1. Karabetsky, D., Sineglazov, V. (2021) “Multi-objective optimization of Hybrid Solar Energy System,” *Věda a perspektivy*, 1(1).

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Sineglazov, V., Karabetsky, D. and Chumachenko, O. (2021) “Multicriteria optimization in the problem of computer-aided design of hybrid solar energy systems”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(2 (111)), pp. 67–78.

3. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2013) “Computer-aided design of solar power plant,” *Electronics and Control Systems*, 2(36).

4. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. R. (2014) “Computer-aided design of motor driver for solar power plant,” *Electronics and Control Systems*, 1(39).

5. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2014) “Analysis of solar power plant’s efficiency,” *Electronics and Control Systems*, 3(41).

6. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2015) “Computer-aided design of solar power trackers,” *Electronics and Control Systems*, 1(43).

7. Karabetsky, D. P. (2016) “ANALYSIS OF SOLAR CHARGE CONTROLLERS,” *Electronics and Control Systems*, 1(47).

8. Karabetsky, D. P. (2018) “Conceptual design of solar unmanned aerial vehicle,” *Electronics and Control Systems*, 2(56).

9. Sineglazov, V. M., Karabetsky, D. P. and Klanovets, O. V. (2020) “MAXIMUM POWER POINT TRACKING FOR PHOTO MODULES,” *Electronics and Control Systems*, 1(63).

Матеріали та тези наукових доповідей:

10. Karabetsky, D. (2016) “Solar rechargeable airplane: Power system optimization,” in *2016 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 218–220.

11. Karabetsky, D. (2017) “Conceptual design of maximum power point tracking for solar rechargeable airplane,” in *2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. IEEE, pp. 58–60.
12. Karabetsky, D. M. (2015) “Flying range of solar airplane,” in *2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. IEEE, pp. 48–49.
13. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2018) “Analysis of solar rechargeable airplane,” in *2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 16–19.
14. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2018) “Conceptual design of solar power system,” in *2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 275–278.
15. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2019) “Conceptual design of solar rechargeable airplane,” in *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. IEEE, pp. 17–20.
16. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2020) “Path planning for solar rechargeable aircraft,” in *2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 126–128.
17. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2013) “Energy system design of solar aircraft,” in *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*. IEEE, pp. 9–11.
18. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2013) “Flying wing design for solar rechargeable aircraft” in *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*. IEEE, pp. 56–58.
19. Sineglazov, V. and Karabetsky, D. (2020) “Hybrid Energy Storage Sysmtes,” in *8. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS (ECRES)*. ISTAMBUL, TURKEY, pp. 596–600.
20. Sineglazov, V. and Karabetsky, D. (2020) “Maximum Power Point Tracking Under Partial Shading Condition Usin Novel Mine Blast Algorithm,” in *8. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS (ECRES)*. ISTANBUL, TURKEY, pp. 590–595.

АНОТАЦІЯ

Карабецький Д. П. Автоматизоване проектування гібридних сонячних енергетичних систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт. – Національний авіаційний університет, Київ, 2021 рік.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності ГСЕС, а так само її елементів, за рахунок побудови системи автоматизованого проектування на основі використання інтелектуальних підходів, зокрема, методів багатокритеріальної оптимізації.

У дисертації розроблена структура системи автоматизованого проектування ГСЕС, що дозволяє оптимізувати структуру і параметри ГСЕС, мінімізувати вартість системи, збільшити надійність, мінімізувати дефіцит енергії для споживачів, мінімізувати забруднення навколишнього середовища, на підставі використання методів багатокритеріальної оптимізації. Розроблена структура СЕС для БПЛА на сонячній енергії до складу якої входить гібридна система накопичення енергії (акумуляторні батареї і суперконденсатори), параметри якої визначаються в результаті рішення оптимізаційної задачі, що дозволяє підвищити надійність, збільшити час польоту, збільшити пікову максимальну потужність енергетичної системи БПЛА. Розроблено новий алгоритм пошуку точки максимальної потужності (МРРТ) який дозволяє підвищити ефективність і швидкість знаходження точки максимальної потужності в умовах часткової затіненості на основі використання еволюційного методу Mine Blast Algorithm. Розроблена система імітаційних моделей елементів ГСЕС, до її складу входять СЕС (сонячні панелі, набір перетворювачів постійного та змінного струму), дизель-генератор, гібридна система накопичення енергії. Розроблену систему автоматизованого проектування ГСЕС впроваджено на ДП «ВО Київприлад»

Ключові слова: гібридна сонячна енергетична система, пошук точки максимальної потужності, система автоматизованого проектування, гібридна система накопичення енергії, алгоритм мінного вибуху, безпілотний літальний апарат з використанням сонячної енергії.

АННОТАЦИЯ

Карабещкий Д. П. Автоматизированное проектирование гибридных солнечных энергетических систем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – системы автоматизации проектных работ. – Национальный авиационный университет, Киев, 2021 год.

Целью исследования является повышение эффективности ГСЭС, а так же ее элементов, за счет построения системы автоматизированного проектирования на основе использования интеллектуальных подходов, в частности, многокритериальных методов оптимизации.

В диссертации разработана структура системы автоматизированного проектирования ГСЭС, что позволяет оптимизировать структуру и параметры ГСЭС, минимизировать стоимость системы, увеличить надежность, минимизировать дефицит энергии для потребителей, минимизировать загрязнение окружающей среды, на основе методов многокритериальной оптимизации. Разработана структура СЭС для БПЛА на солнечной энергии, в состав которой входит гибридная система аккумулирования энергии (акумуляторные батареи и суперконденсаторы), параметры которой определяются в результате решения оптимизационной задачи, позволяет повысить надежность, увеличить время полета, увеличить пиковую максимальную мощность энергетической системы БПЛА. Разработан новый

алгоритм поиска точки максимальной мощности (MPPT), который позволяет повысить эффективность и скорость нахождения точки максимальной мощности в условиях частичного затенения на основе использования эволюционного метода Mine Blast Algorithm. Разработанная система имитационных моделей элементов ГСЭС, в ее состав входят элементы СЭС (солнечные панели, набор преобразователей постоянного и переменного тока), дизель-генератор, гибридная система накопления энергии. Разработана система автоматизированного проектирования ГСЭС введена на ДП «ВО Київприлад».

Ключевые слова: гибридная солнечная энергетическая система, поиск точки максимальной мощности, система автоматизированного проектирования, гибридная система накопления энергии, алгоритм минного взрыва, беспилотный летательный аппарат с использованием солнечной энергии.

ABSTRACT

Karabetsky D. P. Computer-aided design of hybrid solar power systems. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis in candidacy for a degree of candidate of engineering science in the specialty 05.13.12 – computer-aided design systems. – National Aviation University, Kyiv, 2021.

One of the main trends of recent decades is the search for and implementation of renewable energy sources, including solar energy. Given that this type of energy is becoming more attractive and more accessible every year, the problems of dependence on environmental conditions are also becoming increasingly important. Since individual energy sources are unable to meet the load requirements due to uncertainties in the environment, hybridization of the system should be considered in the direction of using additional energy sources in combination with energy storage systems.

The purpose of the dissertation research is to increase the efficiency of HSPS, as well as its elements, by building a system of computer-aided design based on the use of intelligent approaches, in particular, multi-criteria optimization methods.

The dissertation develops the structure of the computer-aided design system of the hybrid solar power system (HSPS), which allows to optimize the structure and parameters of the solar power system, minimize the cost of the system, increase reliability, minimize energy shortages for consumers, minimize environmental pollution, based on multi-objective optimization (MOO) methods.

The approach to the optimization of the structure of the HSPS, which is used in the problem of automated design, in two modes: independent and connected to the network. The proposed HSPS consists of a solar energy system (SPS), a energy storage system based on batteries, a set of diesel generators and a network interaction system. The dissertation defines the power models of the HSPS elements, the proposed control algorithm based on the rules for assessing the state of the system during operation. Energy models in connection with the control algorithm allow the stage of modeling the system for a given time interval. The proposed approach is based on the use of solving the problem of MOO. MOO takes into account the

minimization of system costs and total system cost, minimization of fuel use, maximization of reliability and minimization of the use of non-renewable energy sources. The solution of the MOO problem is based on the use of the Pareto-optimal solution search algorithm based on the NSGA-II genetic algorithm using the proposed set of crossing, mutation and selection operators. The developed procedure allows to determine the structure of the HSPS, which includes a set of the number of solar panels, batteries and DGs. As a result, three versions of the HSPS for a household for two people (Kyiv, Ukraine) are presented in an autonomous mode and in the mode with connection to the electric network. Due to the possibility of selling electricity at a green tariff during the year, the solution found allows to reduce the estimated cost of the system to 45%. A detailed analysis of the system behavior during the year due to the use of simulation is provided.

The structure of SPS for UAVs on solar energy has been developed, which includes a hybrid energy storage system (batteries and supercapacitors), the parameters of which are determined as a result of solving the optimization problem, which allows to increase reliability, increase flight time, increase peak UAV power system.

A new maximum power point search algorithm (MPPT) has been developed, which allows to increase the efficiency and speed of finding the maximum power point in partial shading conditions based on the use of the evolutionary method of Mine Blast Algorithm.

A system of simulation models of HSPS elements has been developed, it includes SPS elements (solar panels, a set of DC and AC converters), a diesel generator, and a hybrid energy storage system. The developed system of computer-aided design of HSPS has been implemented at DP "VO Kyivprylad"

Keywords: hybrid solar energy system, maximum power point tracking, computer-aided design, hybrid energy storage system, mine blast algorithm, unmanned aerial vehicle using solar energy.