

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри**

_____Синеглазов В.М
«_____» _____ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ
«БАКАЛАВР»**

**Тема: «СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
ГІБРИДНИХ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК»**

Виконавець: ст.гр.КП-501 Бз

Руслан БРОНІЧ

Керівник: д.т.н., проф.

Віктор СИНЕГЛАЗОВ

Нормоконтролер: к.т.н, професор

Микола ФІЛЯШКІН

Київ 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віктор СИНЄГЛАЗОВ

“ _____ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботистудента

Броніча Руслана Вікторовича

Тема роботи: «Система автоматизованого проектування гібридних установок.»

- 1. Термін виконання роботи:** з 01.12.2022р. до 20.02.2023 р.
- 2. Вихідні дані до роботи:** Об'єкт- гібридна сонячна енергетична установка, критерії ГСЕС:
 1. ВАРТІСТЬ
 2. ВИКІДИ CO₂
 3. ДЕФІЦИТ ЕНЕРГІЇ
 4. ВИКОРИСТАННЯ НЕВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ
- 3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):**
 1. Поточний стан та преспективи розвитку альтернативної сонячної енергетики у світі.
 2. Автоматизоване проектування гібридних сонячних енергетичних систем.

3. Оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи.

4. Безпілотний літальний апарат з використанням сонячної енергетичної системи.

4. Перелік обов'язкового графічного матеріалу: структура ГСЕС, структура САПР, компонування літака планера, структура сонячного БПЛА, структура проектування БПЛА.

5. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Аналіз актуальної проблеми	01.12.22- 14.12.22	
2	Аналіз сонячної енергетики та її можливості	15.12.22- 31.12.22	
3	Аналіз необхідності застосування системи автоматизованого проектування для побудови гібридної сонячної енергетичної системи	01.01.23- 20.01.23	
4	Дослідження конструкції безпілотного літального апарату на сонячній енергії	21.01.23- 31.01.23	
5	Висновки по роботі та підготовка презентації	16.02.23- 20.02.23	

6. Дата видачі завдання 01.12.2022р.

Керівник: _____ **Віктор СІНЄГЛАЗОВ**
(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ **Руслан БРОНІЧ**
(підпис)

Реферат

Тема кваліфікаційної роботи – «Система автоматизованого проектування гібридних установок»

Робота присвячена розробці Система автоматизованого проектування гібридних установок.

Розроблено структурну схему даної системи. Проведено розробку алгометричного і програмного забезпечення наведено результати використання даної Система автоматизованого проектування гібридних установок.

Пояснювальна записка до роботи містить: 68 сторінок, 20 рисунків, 6 таблиць.

ГІБРИДНА СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПРОЕКТУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – гібридна сонячна енергетична установка.

Предмет - Система автоматизованого проектування гібридних установок.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка структури САПР, математичного та Система автоматизованого проектування гібридних установок.

Метод дослідження – моделювання розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. Сонячна енергетика та її можливості.....	10
1.1 Поточний стан та перспективи розвитку альтернативної сонячної енергетики у світі.....	10
1.2 Гібридна енергетична система як спосіб підвищення ефективності використання сонячної енергії.....	11
1.3 Структура гібридної сонячної енергетичної системи.....	18
1.4 Необхідність застосування системи автоматизованого проектування для побудови гібридної сонячної енергетичної системи.....	21
РОЗДІЛ 2. Автоматизоване проектування гібридних сонячних енергетичних систем.....	25
2.1 Постановка задачі автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних систем.....	25
2.2 Структура системи автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних систем.....	26
РОЗДІЛ 3. Оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи.....	29
3.1 Оптимізація конфігурації гібридної сонячної енергетичної системи.....	29
3.2 Структурно-параметричний синтез гібридних сонячних енергетичних систем з використанням багатокритеріальної оптимізації.....	33
РОЗДІЛ 4. Безпілотний літальний апарат з використанням сонячної енергетичної системи.....	42
4.1 Використання сонячної енергії у безпілотному літальному апараті.....	42
4.2 Конструкція безпілотного літального апарату на сонячній енергії.....	45
4.3 Система автоматизованого проектування безпілотного літального апарату на сонячній енергії.....	47
ВИСНОВКИ.....	60

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ГСЕС - Гібридна сонячна енергетична система.

СЕС - Сонячна енергетична система.

ВДЕ - Відновлювані джерела енергії.

ГЕС – Гідро електро станція.

МЕА - Міжнародного енергетичного агентства.

ГВЕС - Гібридна відновлювальна енергетична система.

ВЕ - Відновлювана енергія.

АЕ - Альтернативна енергія.

ПЕ – Паливні елементи.

МТ – Мікротурбіна.

БПЛА – Безпілотний літальний апарат.

ВСТУП

Однією з основних тенденцій останніх десятиліть є пошук і впровадження альтернативних 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 накопичення і зберігання 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 зберігання і накопичення 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 підстанція в режимі з підключенням до енергомережі.

Отже, при побудові даного виду систем 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.

РОЗДІЛ 1

СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЇЇ МОЖЛИВОСТІ

1.1 Поточний стан та перспективи розвитку альтернативної сонячної енергетики у світі.

Відновлювана енергія – це енергія, вироблена за допомогою ресурсу, який швидко заповнюється (відновляється) у результаті природнього процесу, що не припиняється.

З економічної точки зору відновлювані джерела енергії (ВДЕ) можна розглядати як ефективний засіб стимулювання інноваційної й ділової активності в національних економіках, створення додаткових робочих місць, формування нових значних джерел надходжень від імпорту обладнання.

Експерти ООН запропонували наступну класифікацію ВДЕ:

- сонячна й вітрова енергія;
- енергія від використання торфу, біомаси, включаючи відходи сільського, лісового, промислового й комунального сектору;
- енергія падаючої води, включаючи ГЕС, потужністю меншою за 1 МВт;
- геотермальна енергія;
- хвильова енергія, включаючи енергію течій, припливів і відливів, а також енергія температурних перепадів океану;
- енергія залишкового тепла землі (низькопотенціальна енергія).

Одним із ключових векторів сталого розвитку високотехнологічних країн став вибір екологічно чистої енергетики майбутнього, який включає [1]:

- застосування інноваційних принципів вироблення відновлюваної енергії, що сприяє її ефективному використанню, дасть додатковий імпульс охороні навколишнього середовища, забезпечить надійне енергопостачання й підвищення конкурентоспроможності економіки;
- енергозбереження на благо екологічно чистого майбутнього, враховуючи, що викопне паливо довгий час буде затребуване світовою енергетикою, дасть

- пріоритет тим інноваційним технологіям, які будуть спрямовані на зниження його шкідливого впливу на навколишнє середовище;
- стимулювання науково-дослідних розробок, спрямованих на впровадження екологічно чистої енергетики;
 - створення джерел фінансування ВДЕ шляхом удосконалювання ринкових інструментів, включаючи податкові;
 - пом'якшення наслідків кліматичних змін, шляхом вироблення необхідних заходів для розвитку ринків технологій «чистої» енергетики, підвищення їх доступності для країн, що розвиваються.

За прогнозом Міжнародного енергетичного агентства [2] (МЕА), до 2025 року споживання електроенергії у світі досягне 26 трлн. кВт/год, при цьому встановлена потужність електростанцій сягатиме 5500 ГВт, до 2035 року – 32 трлн. кВт/год, встановлена потужність електростанцій досягне 5900 ГВт. Значну роль (близько 44%) у досягненні заявлених параметрів лідери провідних держав відводять ВДЕ, оскільки традиційні способи вироблення електрики, мають обмежений первинний ресурс, завдають певної шкоди навколишньому середовищу [3].

У 2014 році за даними щорічного інвестиційного дослідження UNEP [4] глобальні інвестиції у ВДЕ досягли 290 млрд. євро, а в 2015 році цей показник перевищив 329 млрд. доларів США [5].

Наявність технологічних інновацій призвело до впровадження поліпшених виробничо-споживчих продуктів ВДЕ з меншими витратами ресурсів. В умовах достатнього вітрового і сонячного потенціалу й не завжди передбачуваних цін на нафту, а також дорогої інфраструктури для їхнього застосування, ВДЕ починають успішно конкурувати із традиційною енергетикою.

1.2 Гібридна енергетична система як спосіб підвищення ефективності використання сонячної енергії.

Автономні системи відновлюваних джерел енергії не є надійними через непостійну доступність та зміни кліматичних умов. В останні роки системи з

відновлюваними джерелами енергії, такі як автономні сонячні фотоелектричні, вітрові системи були впроваджені по усьому світу в порівняно більших масштабах. Ці незалежні системи не можуть забезпечити безперервне джерело енергії оскільки вони сезонні по своїй природі, фотоелектрична енергетична система не може забезпечити надійною потужністю в несонячні дні, автономна вітрова система не може задовольнити вимогам постійного навантаження внаслідок значних флуктуацій величини швидкостей вітру від години до години протягом року. Очевидно, що комбінація двох або більше відновлюваних джерел енергії більш ефективна, ніж система з одним джерелом з погляду ціни, ефективності й надійності. Така система називається гібридною відновлюваною енергетичною системою (ГВЕС) і стає елементом ринку, що найбільш швидко розвивається в усьому світі.

Як результат, використання вітрової й сонячної фотоелектричної генерації енергії стає реальністю. Однак не можна відмовлятися від інших джерел відновлюваної енергії (ВЕ) / альтернативної енергії (АЕ), технологій генерації, таких як океанська хвиля й припливи, осмотична, геотермальна, паливних елементи (ПЕ) та мікротурбін (МТ).

Гібридна відновлювальна енергетична система(ГВЕС) поєднують два або більше відновлюваних джерел для вироблення енергії, так що кожен з них може компенсувати недоліки іншого при забезпеченні навантаження, а система генерування енергії може забезпечувати безперервне енергопостачання в різних погодних умовах і потенційно покращує ефективність системи і надійність енергопостачання. Очевидно, що комбінація різних поновлюваних ресурсів повинна бути адаптована на основі умов кожного зазначеного місця розташування.

Гібридизація призводить до збільшення надійності системи ВДЕ, однак передбачає оптимальний вибір джерел енергії та технологій їх відбору, що буде визначати методологію проектування таких систем для покращення експлуатаційних характеристик, розв'язання завдань диспетчеризації й керування.

Різні джерела генерації можуть сприяти один одному у досягненні більш високої енергетичної ефективності і/або поліпшувати функціонування.

Короткий огляд різних технологій генерації енергії ВЕ / АЕ й різних схем зберігання енергії, які можуть використовуватися в гібридних системах наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Короткий огляд різних технологій генерації енергії ВЕ / АЕ й різних схем зберігання енергії

Основні технології ВУ / АУ	Варіанти накопичення енергії
Біомаса	Акумуляторна батарея
Геотермальна	Стиснене повітря
Гідро/мікрогідро	Махове колесо
Океанські припливи/Хвилі	Водень
Сонячні фотоелектричні панелі	Гідравлічні насоси
Вітер	НМСЕ
Паливний елемент	Суперконденсатор

Будь-яка комбінація технологій генерації енергії ВЕ/АЕ за належного зберігання і, можливо, у комбінації із традиційною технологією генерації, наприклад, дизель-генератором, може утворювати гібридну енергетичну систему. Наприклад, гібридна система може мати будь-яку комбінацію систем: вітроенергетичної, сонячної на базі фотоелектричних панелей, мікро-гідро, мікротурбіни, звичайного дизель-генератора, акумуляторної батареї й сховища водню, зробленого на основі електролізу, у мережевій або автономній конфігурації.

Гібридні системи електроживлення можуть бути спроектовані як автономні або підключені до мережі системи. Багато параметрів, такі як доступна потужність, вартість електроенергії та індивідуальні метеорологічні характеристики бажаного місця. Системи, підключені до мережі, спроектовані таким чином, щоб вони могли покривати місцеві енергетичні вимоги, і залежно від доступної потужності

виробляється надлишкова потужність яка може бути продана в мережу для передачі в інші місця попиту. [6] Крім того, у разі нестачі енергії при виробництві відновлюваних ресурсів, необхідна потужність може бути забезпечена мережею, таким чином, цим системам не потрібна окрема система зберігання для підтримки надійності, оскільки мережа буде працювати як нескінченна резервна система.

З іншого боку, автономні гібридні поновлювані системи є найбільш перспективним рішенням для доставки електроенергії у віддалені місця. Тим не менш, оскільки для цих систем відсутня підключення до мережі, їм потрібен резервний або допоміжний блок, такий як акумуляторні батареї або звичайні дизельні генератори, для допомоги у підтримці надійності.

Як у випадку підключення до мережі, так і в окремих випадках інвестиційні витрати на забезпечення електроенергією з поновлюваних джерел і надійність проектованої системи зазвичай є проблемами, які мають першорядне значення при довгостроковому плануванні енергетичних систем і, як наслідок, при виборі кращого поновлюваного джерела енергії; Важливе значення має оптимальне рішення серед різних можливих комбінацій поновлюваних джерел енергії. [7] ГВЕС, в основному, ділиться на три типи: системи з прив'язкою до постійного струму, системи з прив'язкою до змінному струму і системи з одночасною прив'язкою до постійному і змінному струму (гібридної прив'язкою).

Системи з прив'язкою до постійному струму — це системи, які повністю побудовані на основі пасивних джерел вироблення електроенергії. Всі ці системи підключаються до головної шини постійного струму до того, як вона підключиться до мережі. BESS підключений до контролера, який здатний постачати електроенергію з необхідними характеристиками, по струму і напрузі. Рисунок 1.1 ілюструє найбільш просту систему з контролером заряду, який збирає всю енергію з встановлених поновлюваних джерел енергії. Вихід контролера заряду або двонаправлено підключений до акумуляторної накопичувача енергії (зібрана електроенергія накопичується для автономного використання, коли це необхідно), або до навантажень постійного струму.



Рис. 1.1– Приклад спрощеної структури ГСЕС постійного струму

Системи з прив'язкою до змінному струму — це системи, які зазвичай з'єднують навантаження з шиною змінного струму. Дана структура зовсім інша в порівнянні з попередньою системою. Система з прив'язкою до змінному струму завжди підключено до мережевого інвертора, як показано на рисунку 1.2. Має два режими: 1) нормальний режим роботи і 2) критичний режим. У нормальному режимі, інвертор підключений до мережі дозволяє системі працювати від відновлюваних джерел енергії, а також накопичувати енергію. Критичний режим роботи активується в період відключення живлення, при якому мережевий інвертор використовує накопичувач для підтримки основної системи.

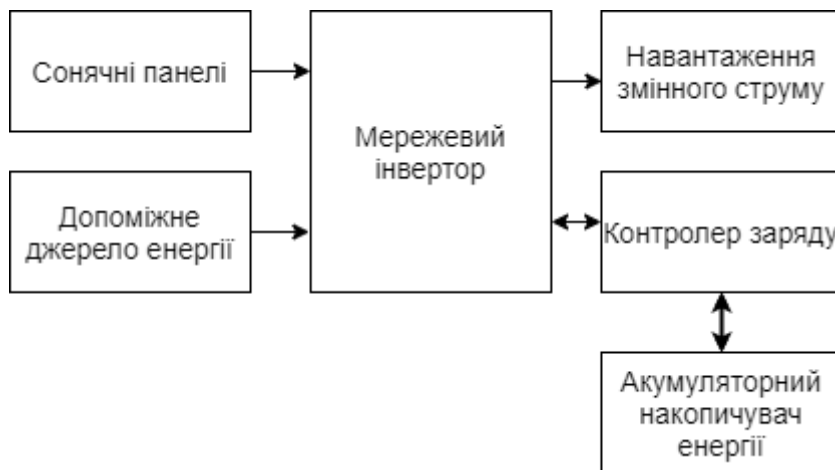


Рис. 1.2– Приклад спрощеної структури ГСЕС змінного струму

Системи з гібридною прив'язкою, показані на рисунку 1.3, включають кілька типів електростанцій, що працюють на викопному паливі, і з використанням доступних поновлювальних джерел енергії. Усі ці компоненти вироблення електроенергії зазвичай підключені до однієї основної системи управління. В наші дні

підвищується інтерес до гібридних парних систем для виробництва електроенергії у віддалених місцях. В даній системі електрика постійного струму генерується та використовується для подачі до навантажень постійного струму, а надлишкова енергія накопичується для використання у період пікового навантаження. Коли накопичена електроенергія буде повністю використана, потужність системи буде переключена на генераторну установку.

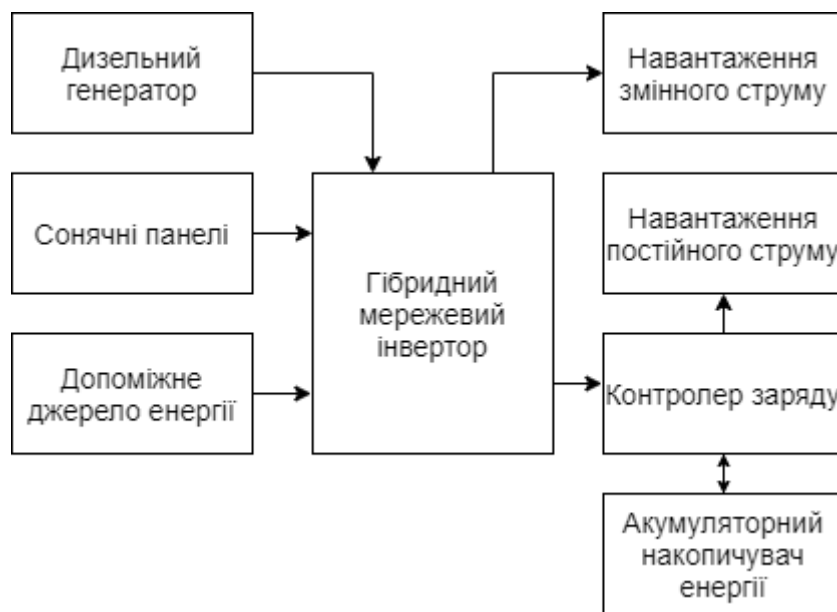


Рис. 1.3– Приклад спрощеної структури ГСЕС з гібридною прив'язкою

Щоб забезпечити максимальну ефективність усієї системи, одночасно сприяючи максимальному скороченню викидів у навколишнє середовище, разом з тим мінімізуючи витрати на виробництво енергії, необхідно використовувати методи багатокритеріальної оптимізації і керування для визначення структури системи й оптимального розподілу одержуваної енергії з різних джерел.

Джерела ВЕ / АЕ мають різні робочі характеристики; тому важливо мати чітко визначену й стандартизовану структуру/процедуру для їхнього з'єднання з метою створення гібридної системи або, більш широко, мікромережа, де локальний кластер джерел розподілених джерел енергії, накопичувачів енергії й навантажень інтегруються разом і здатні автономно працювати. Робастна мікромережа також повинна мати можливість реалізації технології «ввімкнув і працюй», відповідно до якої, елементи (ДГ, систему зберігання енергії або

кероване навантаження), можуть бути додані в існуючу систему (microgrid), не вимагаючи реконфігурації системи для виконання своєї розробленої функції, а саме: генерації потужності, забезпечення енергоємності або здійснення контролю навантаження.

Для того, щоб вибрати оптимальну конфігурацію гібридної системи, що відповідає вимозі навантаження, оцінювання повинно проводитись на основі критеріїв надійності електроживлення й вартості системи життєвого циклу.

До складу гібридних систем можуть також входити джерела теплової енергії (біогазові установки, сонячні теплові колектори) і джерела на органічному паливі (дизель-генератори), які виконують роль резервного живлення. Технологічні конфігурації можуть бути класифіковані відповідно до виду напруги у мережі: постійного, змінного струму або змішані лінії.

У гібридній системі постійного струму всі компоненти з вироблення електрики пов'язані з лініями постійного струму, від яких заряджаються батареї. Батареї повинні мати захист (контролер) від перезарядження й повного розряду. Напруга від джерел змінного струму (вітро-гідротурбіни, дизель-генератор) перетворюється в постійну за допомогою конверторів. Напруга яка виробляється у відповідності до попиту подається на навантаження постійного струму. Навантаження змінного струму живляться через інвертор.

У гібридних системах змінного струму основні джерела напруги можуть бути пов'язані прямо з лінією змінного струму або ж через додаткові конвертори для забезпечення необхідних характеристик змінного струму (актуально у разі з'єднання системи із централізованою електромережою). В обох випадках двонаправлений інвертор контролює подачу енергії для зарядки акумуляторів, а також від акумуляторів на навантаження змінного струму. Навантаження постійного струму можуть забезпечуватися напругою від акумуляторів.

На основі вищенаведеного можна відмітити наступні особливості гібридних систем, які роблять їх високоефективними і конкурентоспроможними:

- гнучкість вибору палива, надійність (використання надлишкових технологій і/або зберігання енергії), економічність, зменшення шкідливих викидів;

- можливість включення до їх складу теплових, високопотужних й високоефективних пристроїв (паливні елементи, сучасні матеріали, системи охолодження, тощо);
- можливість одночасно забезпечувати підвищення якості і доступності електроенергії;
- можливість в залежності від місця знаходження включати максимальну кількість відновлюваних джерел енергії;
- забезпечення значно нижчого рівня шкідливих викидів в порівнянні з традиційними технологіями, які використовують корисні копалини;
- досягнення бажаних характеристик при найнижчій прийнятній вартості, що є ключем до прийняття ринком.

1.3 Структура гібридної сонячної енергетичної системи

Структура ГСЕС (рис. 1.4) складається з 3 основних підсистем, на які вона орієнтована: підсистема споживачів, модуль постачальників і модуль управління ГСЕС. [10]

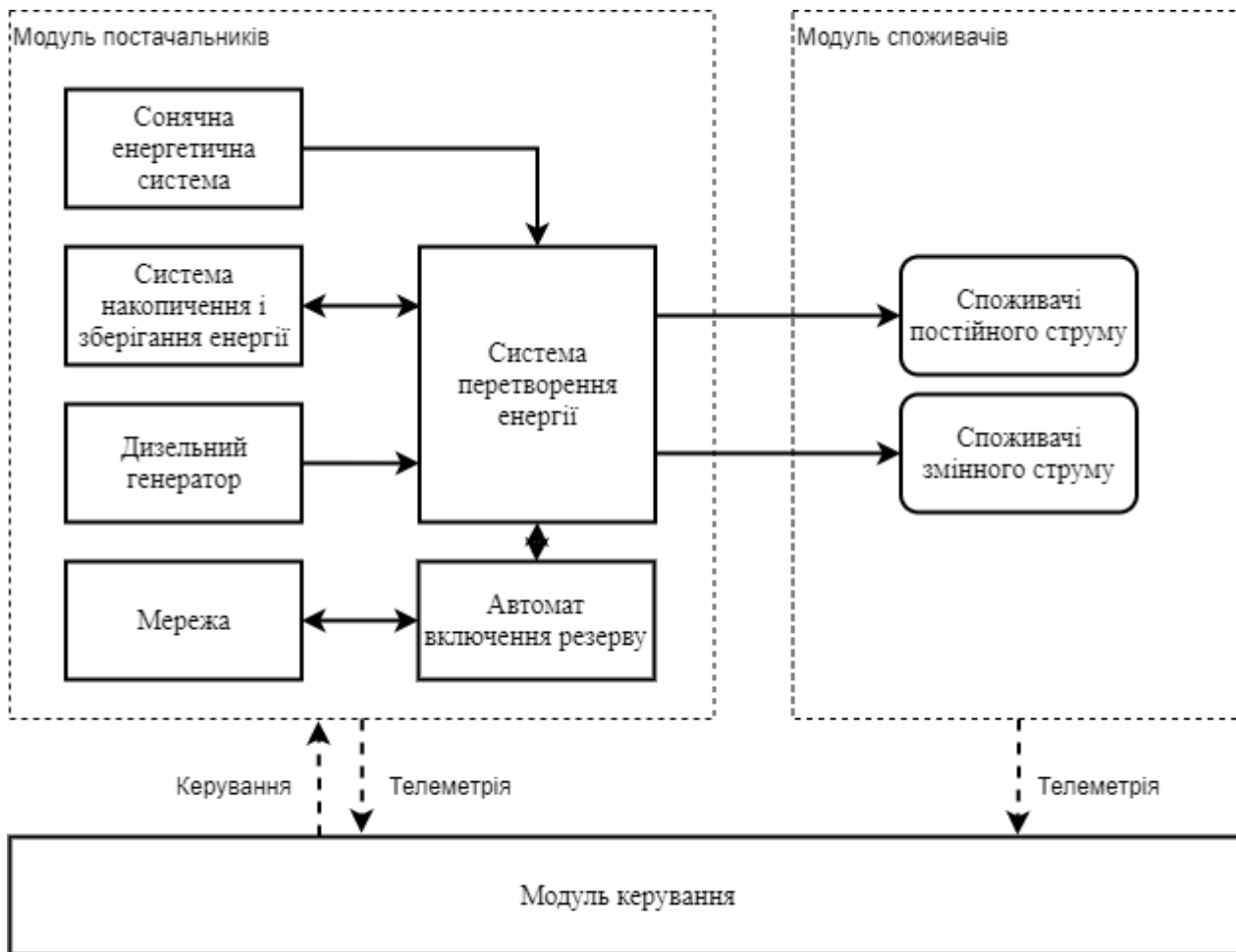


Рис. 1.4– Структура ГСЕС

У свою чергу, підсистема постачальників електроенергії включає в себе: сонячну енергетичну установку, систему накопичення і зберігання енергії, дизель-генератори, модуль підключення до енергомережі із застосуванням автомата включення резерву, а також набір допоміжних пристроїв, необхідних для функціонування, з'єднання та об'єднання підсистем вираженому у вигляді системи перетворення енергії.

Підсистема споживачів — це, по суті, набір вимог підключення ГСЕС до кінцевого користувача системи. У спрощеному уявленні, це споживачі постійного і змінного струму.

Підсистема управління здійснює функції контролю підсистем ГСЕС, їх координації та управління, а також збір телеметрії, стану та аналіз як постачальників, так і під'єднаних споживачів. Так само може використовуватися

для моніторингу і оптимізації продуктивності системи генерації або передачі енергії.

Дизель-генераторні установки (рис. 1.5) забезпечують енергію за рахунок споживання палива. Вони більшу частину часу використовуються в мережах з поганим енергопостачанням (періодичне відключення електроенергії) або поза мереж в якості резервного або основного енергетичного ресурсу. Їх високі експлуатаційні витрати через постійну потребу в паливі для живлення всього під'єднаного устаткування, але можуть навіть зрости через коливання вартості палива.

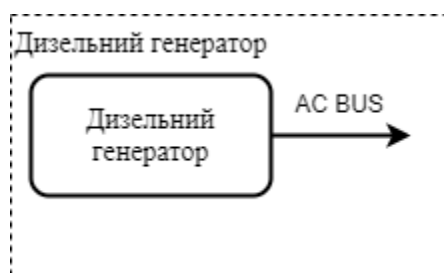


Рис. 1.5– Структура блоку дизель генератора

Сонячна енергетична система (рис. 1.6) являють собою закінчений генератор, що складається з будь-якої кількості фотоелектричних модулів і панелей.

Фотоелектричні панелі призначені для поглинання сонячних променів в якості джерела енергії для вироблення електроенергії. Вони використовують сонячну фотоелектричну (PV) технологію, що перетворює сонячну радіацію в постійний струм.

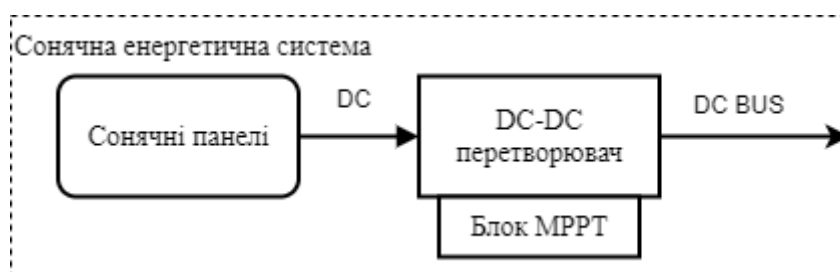


Рис. 1.6– Структура блоку джерела сонячної енергії

Система перетворення енергії – набір допоміжних пристроїв, необхідних для функціонування, з'єднання та об'єднання підсистем. Є одним з найважливіших

елементів ГСЕС, так як бере на себе всю функцію комутації, узгодження рівнів електроенергії та інших характеристик мережі. Як окремий випадок даної системи може виступати інвертор, він перетворює постійний струм (DC) в змінний струм (AC), а так само різного роду перетворювачі змінного і постійного струму.

Блок зберігання енергії(рис 1.7) може бути доданий для зберігання надлишкової енергії, що забезпечується системою. Таким чином, використовується при нестачі або відсутності доступної енергії на одному або більше джерелах.

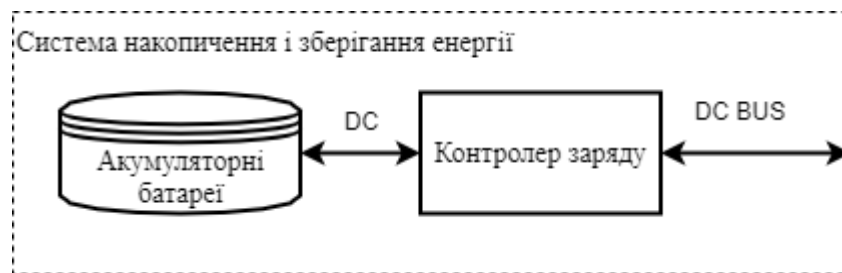


Рис. 1.7– Структура блоку акумуляторної системи зберігання

Також, слід звернути увагу, що результуюча структура ГСЕС безпосередньо пов'язана зі сценарієм експлуатації, вимог надійності, а також наявності, можливості підключення до енергомережі.

Автомат ввімкнення резерву – автоматичне ввімкнення резервного джерела живлення для забезпечення безперебійного електропостачання.

Мережа – можливість ГСЕС підключатися до загальної енергомережі для забезпечення безперебійного електропостачання споживачів, а так само в цілях продажу відновлюваної електроенергії.

1.4. Необхідність застосування системи автоматизованого проектування для побудови гібридної сонячної енергетичної системи

При проектуванні ГСЕС слід враховувати безліч технічних і економічних проблем, серед яких вибір розташування системи, оцінка попиту, вибір комплексу технічних засобів, моделювання поведінки системи, розмір системи, а так само підходи до управління. Для того, щоб комплексно вирішити даний набір завдань

варто застосовувати системи автоматизованого проектування та розробки, так як проблеми, пов'язані з ГСЕС, вимагають ґрунтовних досліджень в декількох областях. Завдання, які потрібно вирішувати при проектуванні ГСЕС розглянуті нижче [7, 8].

Розташування і потім. Вибір місця розташування ГСЕС дуже важливе завдання так як потенціал відновлюваних джерел енергії безпосередньо залежить від цього вибору. Сам же енергетичний потенціал системи рідко вивчається при проектуванні систем, так як найчастіше при гібридизації ставиться завдання зменшити залежність від вже доступного джерела енергії, наприклад, мережі або викопного палива, щоб збільшити екологічну стійкість системи і зменшити залежність від палива. Це призводить до того, що місце розташування визначається розміщенням вже доступного джерела енергії.

Вибір джерел енергії. Належне впровадження джерел для досягнення оптимізації операційної системи для стратегії управління енергоспоживанням — це повинно гарантувати, що потужність, що виробляється поновлюваними джерелами, може бути максимально оптимізована без перемикання на використання мережі. Крім того, щоб допомогти ГСЕС працювати на мінімальному рівні виробництва енергії, але все одно бути в змозі працювати з оптимальною продуктивністю, коли виникають переривчасті природні умови.

Вибір комплексу технічних засобів. Дана задача має на увазі, що на етапі проектування розглядаються рішення щодо вибору варіантів структури і конфігурації ГСЕС у відношенні елементів і блоків системи. При вирішенні цієї задачі слід враховувати і оцінювати сценарії використання, ключові вимоги до системи, а також набір різних факторів, у тому числі:

- доступність відновлюваних джерел енергії;
- тип доступних технологій генерації;
- тип навантаження;
- конфігурації з'єднання елементів змінного та постійного струму (набір інверторів, перетворювачів);

- наявність і цілі системи зберігання енергії (накопичувати і використовувати під час раптової недоступності поновлюваних джерел енергії), у тому числі правильний вибір конфігурації HESS, щоб забезпечити безперервну подачу електроенергії протягом недоступного періоду використання відновлюваних джерел енергії, для зберігання енергії для компенсації пікових навантажень);
- наявність резерву (дизель генератор);
- наявність підключення до мережі;
- очікуване підвищення ефективності за рахунок контролера/оптимізації системи управління або встановлення механізму стеження для максимізації проникнення енергії з відновлюваних джерел;
- інші нетехнічні аспекти, що враховуються при проектуванні, включають надійність джерела живлення або економічний вплив на вартість енергії до естетики, шуму або прогнозів технічного обслуговування та економії викидів вуглецю.

Моделювання і перевірка рішення. Моделювання - це етап, на якому реальні енергетичні системи виражаються у вигляді моделі або набору моделей, котрий заснований на певних вхідних даних і математичних моделях. Програмна реалізація дає основні очікувані результати роботи системи. Моделювання зазвичай відбувається після вибору проекту та результатів, надаються моделлю, що полегшує прогнозування енергії, що виробляється поновлюваними джерелами і традиційної генерацією, і полегшує розуміння очікуваного робочого поведінки інших компонентів системи, таких як акумуляторні батареї або резервні системи (дизель-генератор).

Розмір системи. Розмір досліджуваних ГСЕС в основному визначається встановленою потужністю генеруючих джерел енергії, загій і максимальний потужністьма, а так само кількісними характеристиками того чи іншого блоку.

Робота системи та стратегії управління. Завдання забезпечення роботи і управління – включає в себе набір алгоритмічних рішень, які спрямовані на забезпечення належного нагляду, координації, управління і контролю різних завдань, призначених для кожної підсистеми, щоб забезпечувати функціонування

системи та досягнення високої ефективності з точки зору її роботи та функціональності, а так само, ідентифікацію та адаптацію поведінки системи під вимоги, а так само профіль споживача

РОЗДІЛ 2.

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ГІБРИДНИХ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Постановка задачі автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних систем

В даний час розробка енергетичних систем з використанням поновлюваних джерел енергії (ВДЕ) заснована в цілому на ряді інженерних підходів до проектування окремих компонентів, що свідчить про відсутність науково обґрунтованої методології розробки енергетичних систем з використанням ВДЕ як єдиного цілого. Оптимізація параметрів окремих складових частин і компонентів ускладнена у зв'язку з наявністю збурень, викликаних взаємовпливом компонентів один на одного, їх розміщення і нестабільності умов експлуатації. Вирішення цієї проблеми може полягати в створенні оптимальних технологічних комплексів, побудованих на основі впровадження методології з системним науковим підходом і застосуванням сукупності різних методів, а також з використанням науково обґрунтованих технічних, технологічних та економічних рішень.

Основними критеріями 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.

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

$$Cost_{system} = Cost_{buy} + Cost_{maintenance} + Cost_{fuel} + Cost_{grid},$$

де $Cost_{buy}$ – вартість елементів системи, $Cost_{maintenance}$ – вартість обслуговування і заміни елементів, $Cost_{fuel}$ – вартість палива, $Cost_{grid}$ – вартість роботи з енергомережею.

Викиди CO2 – один з екологічних критеріїв, пов'язаний з експлуатацією резервного джерела живлення дизель-генератора. Розрахунок викидів розраховується в наступному вигляді:

$$E_{emission} = \sum_t P_{dgr}(t)K_{CO_2},$$

де K_{CO_2} – коефіцієнт викидів (г/кВтг), P_{dgr} – номінальна потужність дизель-генератора.

Дефіцит енергії – критерій використовується для вимірювання надійності системи, при якому вимірюється величина браку енергії за весь період експлуатації.

$$E_{deficit} = \sum_t E_{load}(t) - E_{available}(t),$$

де E_{load} – необхідна енергія споживачами, $E_{available}$ – енергія доступна в ГСЕС надається системою зберігання енергії, СЕС та дизель-генератором.

Використання невідновлювальної енергії – енергія яка була взята з енергомережі, а так само, при використанні дизель-генератора.

$$E_{NRE} = \sum_t E_{grid}^+(t) + E_{dg}(t),$$

де E_{grid}^+ - електроенергія взята з енергомережі, E_{dg} – енергія згенерована дизель-генератором.

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.

2.2 Структура системи автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних систем

Система автоматизованого проектування включає в себе рішення наступних завдань:

- оптимальний вибір структури ГСЕС;
 - вибір критеріїв оптимізації;

- формування обмежень;
- впровадження алгоритму багатокритеріальної оптимізації;
- 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 МРРТ;
 - розробка алгоритму пошуку;
 - вибір комплексу технічних засобів;
 - імітаційне моделювання;
- автоматизоване проектування системи накопичення і зберігання енергії;
 - розробка структури;
 - розробка блоку батарей;
 - розробка блоку суперконденсаторів;
 - розробка блоку управління перемикачів;
- підсистема керування дизель генератором;
 - вибір комплексу технічних засобів;
 - імітаційне моделювання
- підсистема моделювання гібридної СЕС.

Згідно з вищевикладеними завданнями структура спеціалізованої САПР має наступний вигляд (рис. 2.1).

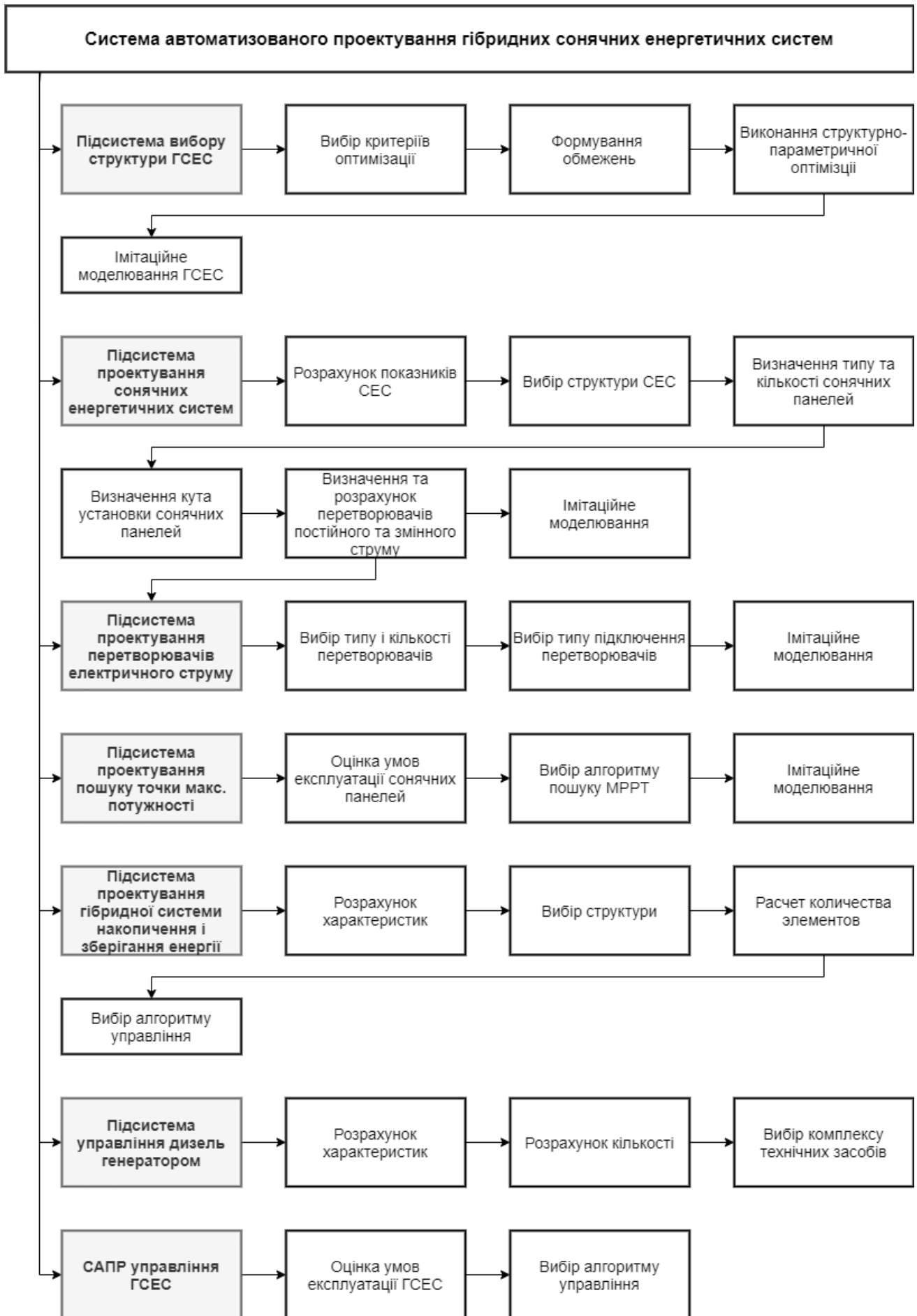


Рис. 2.1– Структура САПР ГСЕС

РОЗДІЛ 3.

ОПТИМІЗАЦІЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

В даному розділі розглядаються підходи для збільшення продуктивності ГСЕС, так як з одного боку при оптимізації необхідно враховувати одночасно безліч критеріїв (мінімізація витрат, мінімізація шкоди екології, максимізація надійності системи і максимізація використання поновлюваних джерел енергії), а з іншого так само виконувати оптимальне управління системою, в тому числі, з використанням оптимального алгоритму пошуку точки максимальної потужності.

3.1 Оптимізація конфігурації гібридної сонячної енергетичної системи

Гібридні системи останнім часом стають все більш популярними, так як їх, можливо, використовувати в мережевому і автономному режимах. Автономні системи дозволяють впроваджувати їх у віддалених районах, де немає доступу до електричної мережі. Системи, що працюють в мережевому режимі, здатні так само поліпшувати загальну якість для об'єктів соціального значення.

Гібридна сонячна енергетична система (ГСЕС) – це система, яка використовує сонячну енергетичну систему (СЕС) для перетворення сонячної енергії (СЕ) в електричну, в поєднанні з традиційними джерелами енергії. В якості традиційних джерел енергії можуть виступати міська електрична мережа (для продажу і купівлі електричної енергії) та дизельні генератори (ДГ), що використовують дизельне паливо.

Впровадження систем зберігання енергії (СЗЕ) з використанням акумуляторних батарей (АКБ) збільшує рівень проникнення ВДЕ та підвищує надійність за рахунок забезпечення балансу в енергосистемі [1].

Підключення СЗЕ все більшою мірою ускладнює процес проектування ГСЕС, так як виникає додаткове завдання управління потоком енергії. Так само ускладнюється процес моделювання, так як застосування АКБ і ДГ вимагає наявності системи управління для забезпечення енергобалансу [1]. Погано

спроектовані системи можуть мати серйозні недоліки, зокрема, неможливість задовольнити енергетичний попит споживачів системи в критичних ситуація, наприклад, в період пікових навантажень.

Класичні постановки завдань для побудови систем автоматизованого проектування далекі від реальних умов функціонування об'єкта. Не враховуються можливі збої в забезпеченні електроенергії, мінливості погодних умов, внаслідок чого з'являється необхідність надмірності як використовуваного обладнання, так і програмного забезпечення, що викликає додаткові витрати.

Таким чином, актуальним є створення нових підходів для вирішення зазначених проблем, як у постановці задачі, так і в її вирішенні із застосуванням математичного моделювання. Які дають можливість оцінити роботу системи на етапі проектування, що дозволяє оптимізувати вибір комплексу технічних засобів і програмного забезпечення побудованої системи.

Внаслідок зростаючої зацікавленості у ГСЕС та інших видах гібридних систем з ВДЕ зростає і кількість досліджень оптимальної конфігурації. Існує безліч літературних джерел, в яких розглядаються гібридні системи, що використовують ВДЕ. Варіанти інтеграції різних ВДЕ, СЗЕ докладно описані в роботі [1].

Предложено безліч підходів побудови ГСЕС на основі рішення задачі багатокритеріальної оптимізації (БКО) з використанням еволюційних алгоритмів із застосуванням різних екологічних і техніко-економічних критеріїв [2–5].

Незважаючи на застосування деталізованих математичних моделей елементів ГСЕС для поліпшення якості розрахунку критеріїв, особлива уваги приділяється розробці і впровадженню алгоритмів системи управління в процедуру оптимізації. Такий крок суттєво підвищує якість моделювання і дозволяє враховувати особливості роботи системи.

В роботі [6] формалізовано безліч різних критеріїв, які використовуються при проектуванні, включаючи технологічні, економічні та екологічні. Одночасний, облік великої кількості критеріїв значно ускладнює пошук оптимальної структури ГСЕС, тому вибір та оптимізація кількості критеріїв є окремим завданням.

Відповідно, автори визначають методологічні підходи до вирішення задачі пошуку оптимальної конфігурації.

В роботі [7] представлено ГСЕС, яка оптимізована з урахуванням капітальної вартості системи і паливних витрат із застосуванням алгоритму рою частинок. Але автори зупинилися тільки на оцінці економічних критеріїв, що є явним недоліком, так як потрібен додатковий облік безлічі факторів надійності системи. Саме такий підхід використовувався в роботі [8], де авторами використовувався алгоритм для рішення БКО на основі лінійного програмування. Оптимізаційна задача вирішувалася з урахуванням економічних обмежень та обмежень, накладених на купівлю і продаж електроенергії. Представлена модель ГСЕС включала в себе використання ДГ для задоволення попиту в пікові періоди, а так само компенсувати недолік генерації енергії фотоелектричної системи. Автори представили результати імітаційного моделювання, які включали в себе роботу всіх компонентів гібридної системи.

У роботі [9] автори провели дослідження використання безлічі економічних і екологічних критеріїв при проектуванні систем на СЕ з урахуванням підключення до електромережі міста. Але фактор використання СЗЕ не порушувалося. Наявність даної системи має величезний вплив на результати проектування, а також на значення використовуваних критеріїв.

В роботі [10] використовувався програмний комплекс HOMER(США) для покращення економічних і технічних факторів при проектуванні гібридних систем електромережі великого готелю, що включає 15 будівель. Незважаючи на те, що проєктована система розглядалася для поліпшення якісних характеристик енергомережі, застосування СЗЕ не розглядалося.

У роботі [11] автори провели оптимізацію структури ГСЕС, використовуючи різні мета-евристичні алгоритми з урахуванням ряду техніко-економічних критеріїв. Набір критеріїв включав: мінімізацію загальної річної вартості системи і витрат на обслуговування, мінімізацію ймовірності втрати живлення. Незважаючи на те, що в роботі детально описано підхід до імітаційного моделювання, як і результати моделювання, запропоноване рішення має істотний недолік. Безліч вибраних

критеріїв було узагальнено у вигляді однієї складної цільової функції. Відповідно при вирішенні багатокритеріальної задачі даний підхід не дозволяє охопити всі оптимальні за Парето рішення.

У результаті аналізу досліджень [2–11] можна стверджувати, що багатокритеріальні методи оптимізації, завдяки їх гарній продуктивності з урахуванням компромісів, широко застосовуються для проектування ГСЕС. Найбільш популярним підходом, запропонованим для вирішення таких проблем, є використання генетичних і еволюційних алгоритмів для вирішення БКО, при проектуванні багатьох гібридних енергетичних систем.

Незважаючи на те, що в дослідженнях [2–4,7,11] розглядаються ГСЕС, що працюють в автономному режимі, для підвищення надійності також може виконуватися підключення до мережі. У ряді ситуацій даний підхід може призвести до економічної вигоди від продажу відновлюваної електроенергії та зниження вартості системи.

У багатьох практичних завданнях проектні змінні повинні відповідати доступною елементної бази (наприклад, інформація з специфікації сонячних панелей) і, отже, не можуть приймати довільні значення. Обмеження, які повинні бути дотримані для вирішення проблеми, називаються проектними обмеженнями, і формуються виходячи з поставленої задачі. Обмеження при проектуванні системи функціонують як кордону, що накладаються на параметри оптимізації і, отже, є ключем до пошуку оптимального рішення [12].

Систематизація результатів наведених досліджень дозволяє вважати, що при проектуванні ГСЕС потрібно, щоб вартість була мінімальною, виконувалися екологічні норми, система володіла надійністю, за умови задоволення вимог по навантаженню. Таксамо ГСЕС повинна мати можливість підключення до мережі, внаслідок чого її оптимальна конфігурація може відрізнитися на увазі наявності додаткового резерву.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є оптимізація структури ГСЕС із застосуванням підходів автоматизованого проектування з можливістю роботи як в автономному, так і в

незалежній режимах, з одночасним урахуванням технологічних, економічних, екологічних цілей.

Для досягнення поставленої цілі необхідне рішення наступних завдань:

- розробити моделі елементів ГСЕС враховуючи параметри процедури оптимізації, а також формалізувати набір критеріїв для вирішення технологічних, економічних, екологічних цілей;
- розробити алгоритм керування елементами ГСЕС та побудувати відповідні імітаційні моделі, що дозволяють перевірити поведінку заданої структури ГСЕС;
- виконати структурно-параметричний синтез ГСЕС з використанням БКО на основі генетичних алгоритмів з метою практичного підтвердження можливості використання запропонованого підходу для рішення прикладних задач.

3.2 Структурно-параметричний синтез гібридних сонячних енергетичних систем з використанням багатокритеріальної оптимізації

Основними критеріями при БКО в процесі проектування виступають: загальна вартість системи ($Z_{ГСЕС}$), кількість викидів CO_2 ($EM_{ДГ}$), загальний дефіцит енергії (E_d) і використання відновлюваної енергії (E_{NRE}).

В результаті завдання БКО представляється у вигляді:

$$\text{minimize } (C_{ГСЭС}, EM_{ДГ}, E_d, E_{NRE}),$$

параметри процедури оптимізації: $N_{СП}, N_{АКБ}, N_{ДГ}$; з урахуванням накладених обмежень на елементи ГСЕС:

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

$$|P_{АКБ}(t)| \leq P_{АКБ,зар},$$

$$|P_{АКБ}(t)| \leq P_{АКБ,разр},$$

$$P_{ДГ}(t) \leq P_{ДГ,н},$$

$$C_{эл}(t) \leq C_{эл}^{max},$$

де $S_{\text{АКБ}}(t)$ – стан заряду АКБ повинно бути в заданих допустимих пресправах (S_{min} ; S_{max}), $P_{\text{АКБ}}(t)$ – миттєва потужності заряду\розряду АКБ повинна не перевищувати допустиму максимальну потужність заряду ($P_{\text{АКБ,зар}}$) і розряду ($P_{\text{АКБ,розр}}$), $P_{\text{ДГ}}(t)$ – потужність дизельного генератора не повинна перевищувати номінальну потужність ($P_{\text{ДГ,н}}$), $Z_{\text{ел}}(t)$ – тариф на купівлю електроенергії в момент часу t не повинен перевищувати максимальну допустиму тариф ($C_{\text{ел,мак}}$).

Існує безліч стохастичних алгоритмів оптимізації багатокритеріальних, таких як NSGA-II, SPEA2, які зберігають архів найкращих знайдених особин на кордоні Парето. Ці два алгоритму безпосередньо конкурують між собою, оснащені механізмом підтримки різноманітності і використовують принцип елітарності. Але алгоритм NSGA-II має меншу обчислювальну складність.

Розроблений ряд моделей, алгоритм системи управління ГСЕС були використані для створення системи імітаційного моделювання в середовищі MATLAB. Для вирішення завдання БКО використовувався генетичний алгоритм NSGA-IIс розміром популяції равним 100.

Генетичний алгоритм недоминируемой сортування II (NSGA-II) має наступні особливості: використовує принцип елітарності, тісний дистанцію і підкреслює недоминируемые рішення. Алгоритм NSGA-II детально описаний у роботі [11]. Оператором схрещування обраний цілочисельний імітує двійковий кросовер, з наступними параметрами: індекс розподілу дорівнює 20, швидкість=0.8.

Оператором мутації була обрана цілочисельна поліноміальна мутація з індексом розподілу 20 і швидкістю 0.33. Відбір особин проводився за рахунок використання бінарної турнірній селекції.

ГСЕС проектується використовуючи історичні дані про довкілля для г.Київ(Україна). Використовуючи програмний комплекс PVGIS розроблений Єврокомісією, були отримані часові ряди для 2015р. Сонячної радіації (рис.3.1) , а також температури навколишнього середовища. Використовуючи інструмент ALPG розроблений Університетом Твенте, був згенерований тимчасової ряд потужностних вимоги для квартири з двома дорослими мешканцями, який представлений на рис. 3.2.

Набір вхідних параметрів для етапу оптимізації включає інформацію щодо вартості та обслуговуванні елементів ГСЕС(табл. 3.1), параметрів елементної бази ГСЕС(табл. 3.2).

Таблиця 3.1

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 3.2

Параметри конфігурації елементів гібридної сонячної енергетичної системи

Параметр	Значення
Параметри СЕС	
Коефіцієнт втрат потужності ($f_{СП}$)	0,85
Потужність панелі при СУВ ($P_{СП,СУВ}$)	320Вт
Температурний коефіцієнт зміни потужності ($K_{ТР}$)	-0,35 %/°C
Параметри СЗЕ	
Ємність АКБ ($Z_{АКБ}$)	225Ач
Напруга на акумуляторі ($U_{АКБ}$)	12В
ККД перетворення система зберігання енергії ($\eta_{АКБ}$)	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)	8760Г
Крок моделювання (Δt)	1р

Рішення оптимізаційної задачі пошуку оптимальної структури ГСЕС в мережевому режимі проводиться в двох варіантах: з активованим і деактивованим обмеженням (20), яке регулює максимально допустимий тариф для купівлі електроенергії. У разі, якщо це обмеження деактивовано, ГСЕС в мережевому режимі може вільно компенсувати дефіцит енергії за рахунок купівлі електроенергії. Якщо це обмеження буде активовано, і виставлено на кордоні денний і нічний зони тарифікації (табл. 3.2), тоді ГСЕС буде компенсувати дефіцит тільки в нічний час доби, так як денний тариф буде неприйнятний для покупки.

Як було сказано раніше, для того щоб провести оптимізацію ГСЕС в автономному режимі, слід активувати додаткове обмеження $E_{cc}(t)=0$.

Виконавши процедуру оптимізації, знайдені рішення, представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

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

Відповідні множини Парето, сформовані в результаті процедури оптимізації, представлені на рис. 3.5–3.7.

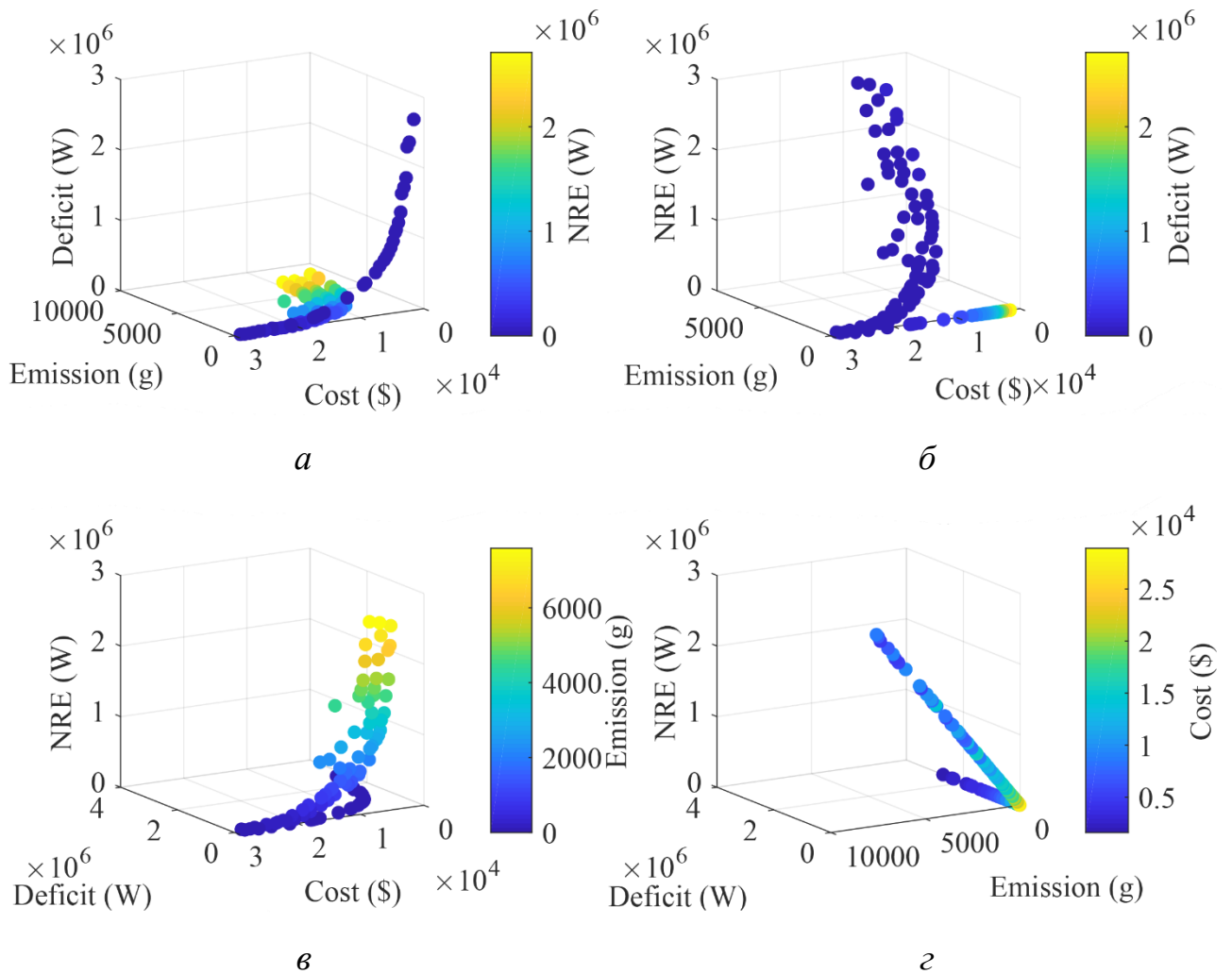
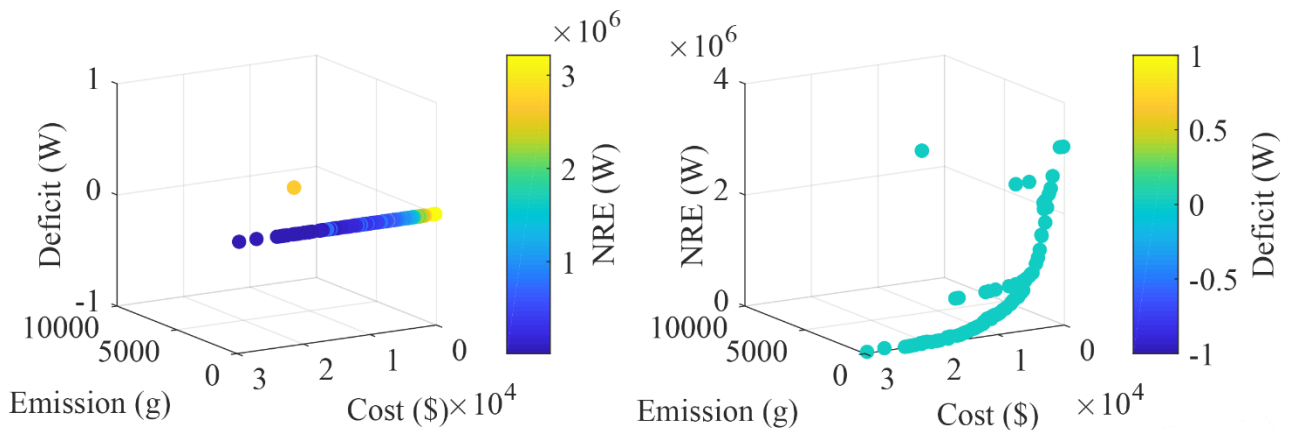


Рис. 3.1– Проекції множини Парето (оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи для незалежного режиму): *a* – простір критеріїв вартість – емісія CO_2 – дефіцит енергії; *б* – простір критеріїв вартість – емісія CO_2 – використання невідновлюваної енергії; *в* – простір критеріїв вартість – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії; *г* – простір критеріїв емісія CO_2 – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії



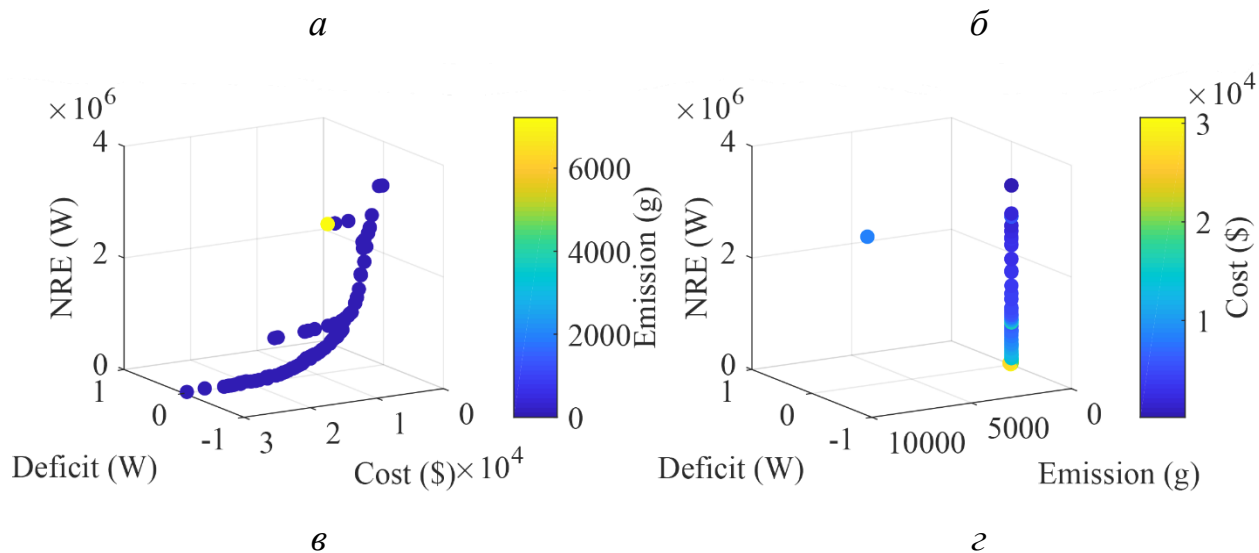
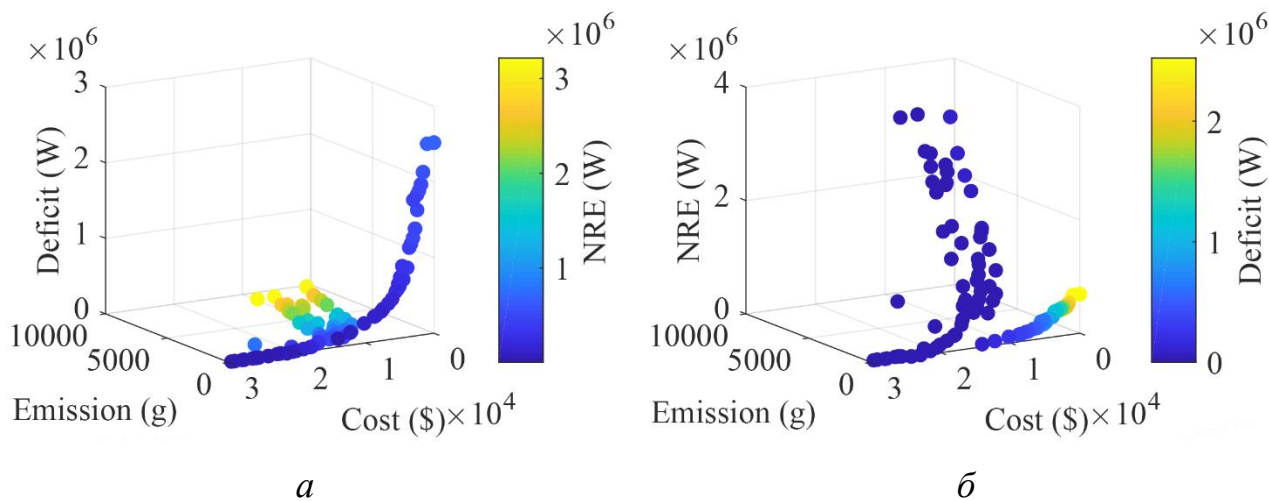


Рис. 3.2– Проекції множини Парето (оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи для мережевого режиму без обмежень на купівлю електроенергії): *a* – простір критеріїв вартість – емісія CO₂ – дефіцит енергії; *б* – простір критеріїв вартість – емісія CO₂ – використання невідновлюваної енергії; *в* – простір критеріїв вартість – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії; *г* – простір критеріїв емісія CO₂ – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії



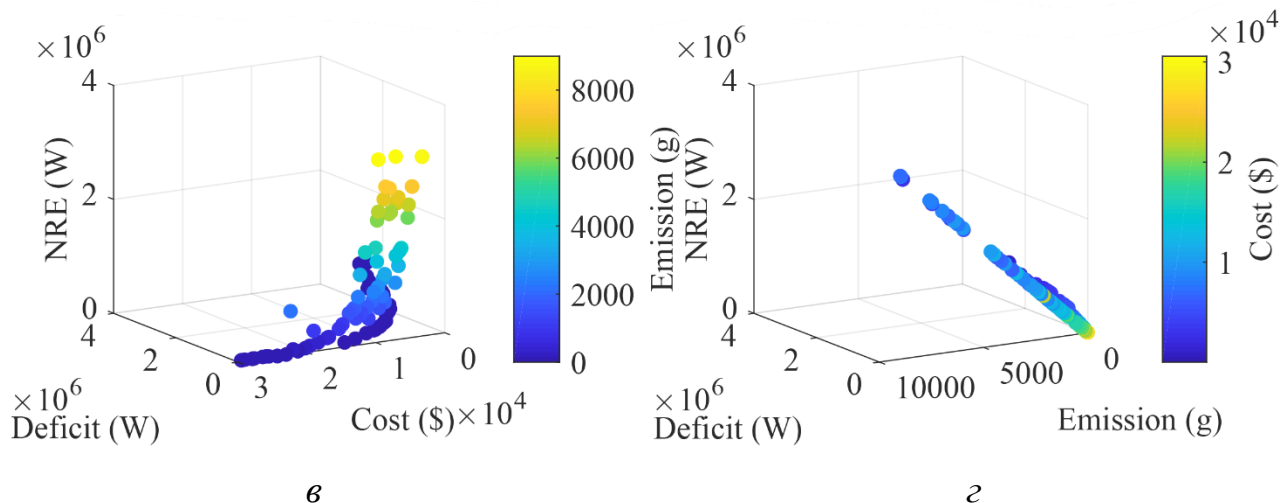
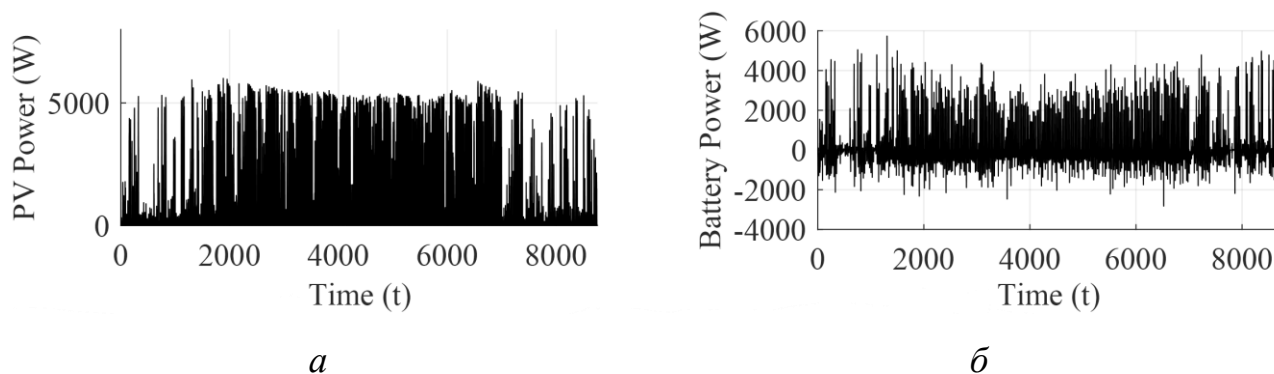
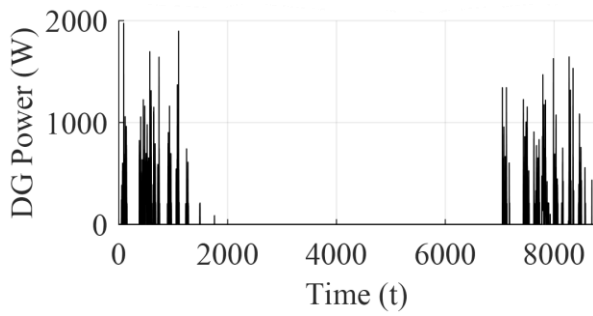


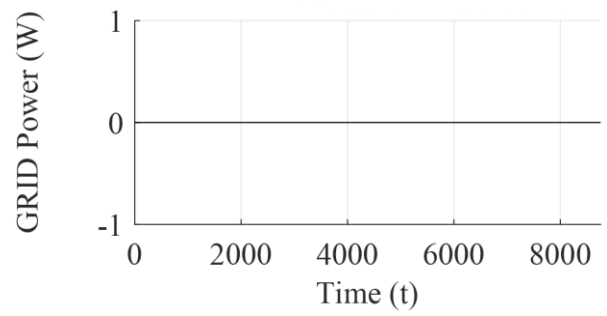
Рис. 3.3– Проекції множини Парето (оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи для мережевого режиму з обмеженнями на купівлю електроенергії за денним тарифом): *a* – простір критеріїв вартість – емісія CO₂ – дефіцит енергії; *б* – простір критеріїв вартість – емісія CO₂ – використання невідновлюваної енергії; *в* – простір критеріїв вартість – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії; *г* – простір критеріїв емісія CO₂ – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії

Так як для кожного проміжного рішення при оптимізації проводиться моделювання року роботи, на рис. 3.3-3.6 відображені результати роботи вищевказаних рішень.



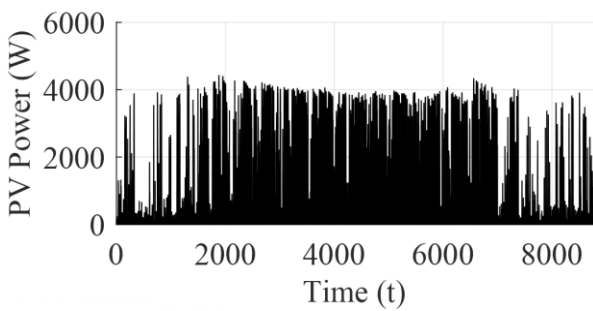


б

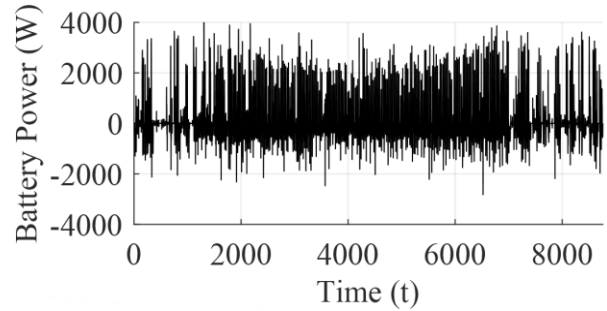


г

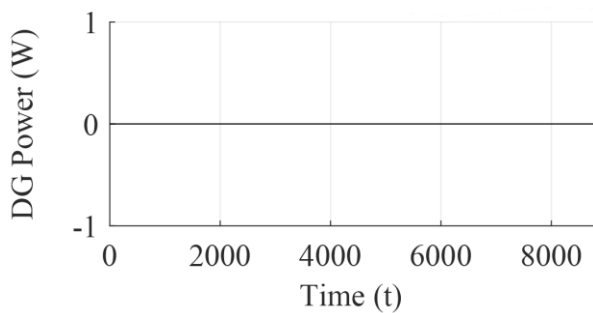
Рис. 3.4– Моделювання року роботи гібридної сонячної енергетичної системи (запропоноване рішення в незалежному режимі): *а* – потужність сонячної енергетичної системи; *б* – потужність системи зберігання енергії; *в* – фактична потужність дизельного генератора; *г* – потужність взаємодії з електромережею



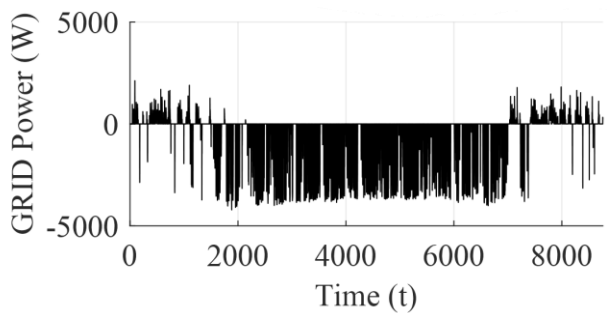
а



б

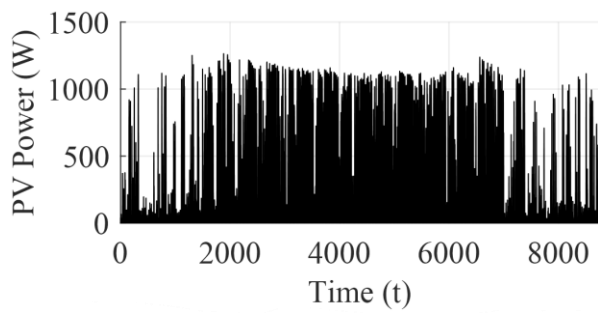


в

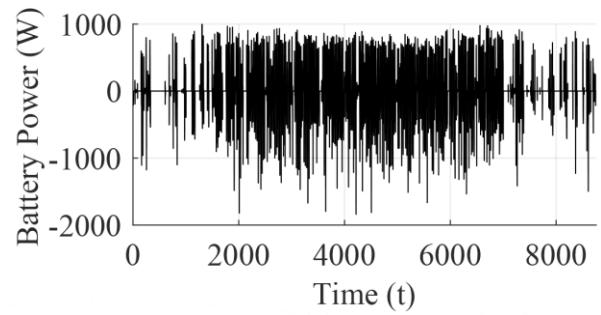


г

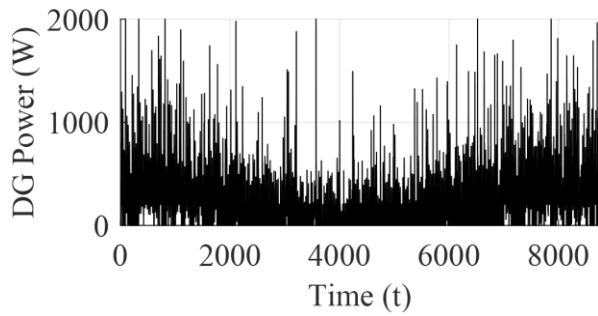
Рис. 3.5– Моделювання року роботи гібридної сонячної енергетичної системи (запропоноване рішення в мережевому режимі без обмежень на купівлю електроенергії): *а* – потужність сонячної енергетичної системи; *б* – потужність системи зберігання енергії; *в* – фактична потужність дизельного генератора; *г* – потужність взаємодії з електромережею



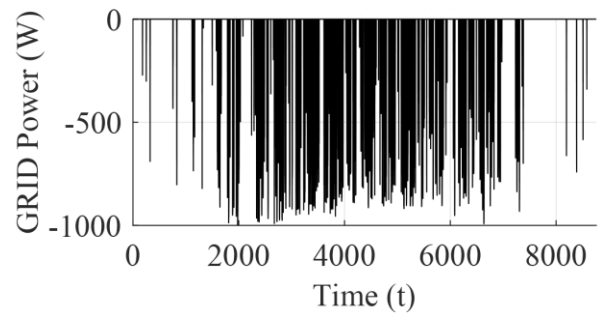
a



б



в



г

Рис. 3.6– 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 зберігання енергії; *г* – фактична потужність дизельного генератора; *р* – потужність взаємодії з електромережею

Дані представлені в результатах включають часові ряди миттєвої потужності кожної з підсистем: СЕС, ДГ, СЗЕ, ЕМ; що дозволяє проектувальнику оцінити роботу ГСЕС.

РОЗДІЛ 4.

БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

4.1 Використання сонячної енергії у безпілотному літальному апараті

Наявність альтернативного джерела енергії у вигляді сонячних панелей може значно збільшити час польоту по порівнянні з безпілотними літальними апаратами, які використовують тільки акумулятори або паливні системи як основне джерело енергії. БПЛА що працюють на сонячній енергії, використовують сонячні панелі для збору сонячної енергії в денний час, яка після перетворення може використовуватися для підтримання польоту і бортових систем.

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 в 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 в протягом нічного періоду часу, і підзарядка в протягом денного періоду.

БПЛА з використанням сонячної енергії можна розділити на три основних типи за характером вибору висоти польоту [3, 5]:

- БПЛА призначені для тривалого висотного польоту (HALE, High-Altitude Long-endurance). До таких можна віднести літаки у великому масштабі з великим розмахом крил. Частіше всього використовуються як рухливі телекомунікаційні платформи;

- БПЛА призначені для тривалого польоту на низькій висоті (LALE, Low-Altitude Long-endurance). Сюди входять БПЛА з невеликим розмахом крил. Застосовуються частіше всього для спостереження та збору інформації;

– БПЛА з можливістю безперервного польоту. Особливий клас БПЛА, який може реалізовувати безперервний політ при заданих обмеженнях (висота польоту, горизонтальний політ, розміри літака тощо).

Основними відмінностями висотного польоту від польоту на низькій висоті є різні погодні умови (дощ, вітер, хмарність) і метеорологічні явища (термічні процеси).

Проблеми побудови безпілотних літальних апаратів на сонячній енергії

БПЛА з СЕС є предметом досліджень досить тривалий час [1, 4]. На сьогоднішній день розроблено безліч легких БПЛА, основними дослідниками в цій області є лабораторія при ETHZ, Швейцарія і група робіт [3, 4, 5]. В даних роботах ставляться завдання визначення можливості безперервного польоту з використанням сонячної енергії з урахуванням особливостей середовища експлуатації (висота, ширина, дата і час польоту, метеорологічні умови), а також завдання визначення основних геометричних параметрів конструкції літака, площі сонячних панелей, для того, щоб забезпечити максимальну тривалість польоту, з урахуванням заданих вхідних користувачем (корисна навантаження, технологічні параметри, параметри проектування структури БПЛА).

Однією з основоположних робіт по темі проектування сонячних БПЛА є [4]. У якій ставиться основною метою проектування сонячного БПЛА який буде здійснювати безперервний політ з використанням сонячної енергії в умовах заданої середовища експлуатації, часу року і місця, а також структурних і технологічних параметрів БПЛА. В роботі ставиться акцент на трьох основних моделях: аеродинаміці БПЛА при сталому горизонтальному польоті, енергетичної моделі БПЛА з урахуванням підсистем і корисною навантаження, а також апроксимуючих моделях мас. На етапі концептуального проектування, проводиться тільки пошук рішення для трьох параметрів конструювання літака: розмах крил, подовження крила і маса БПЛА.

При цьому, концептуальне проектування, будується навколо одного критерію: щоб був достатній запас енергії (енергетичний баланс), для того, щоб літак зміг здійснити безперервний політ. Відповідно під нього шукається доступне рішення

шляхом перебору або рішенням нерівності, яке буде задовольняти енергетичного балансу для здійснення усталеного горизонтального польоту.

Також, в роботі [4] не поставлена багатокритеріальна оптимізаційна задача, введений тільки один критерій, не проводиться пошук оптимальної конфігурації компонування літака, не проводиться оптимізація енергоспоживання БПЛА (крім введення МРРТ), так само як і його показників продуктивності під поставлені завдання.

Завдання розробки БПЛА на сонячних панелях охоплює багато області проектування і розробки [7]:

- 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 низькі енергетичні запаси не забезпечують стійкість до погіршеною погоди (наприклад, хмар або низхідним потоків), а також не дозволяють виконувати польоти у нічний час з корисними навантаженнями

- фактична відсутність корисної навантаження;
- висока складність експлуатації, низьке енергоспоживання і значну вагу

БПЛА призводить до млявою динамікою польоту, що вимагає просунуті алгоритми автопілотування;

– Обмежена автономія без обізнаності про навколишньому середовищі. БПЛА, і зокрема сонячні БПЛА, схильні до впливу навколишнього середовища, Крім рельєфу місцевості місцеві погодні ефекти можуть швидко пошкодити літальний апарат (наприклад, з-за поривів вітру, опадів чи грози) або знизити його характеристики (наприклад, через хмари).

Розробка сонячного БПЛА починається з етапу специфікації сценарію використання і параметрів середовища експлуатації, а також доступних

технологічних параметрів, на підставі яких визначаються основні структурні параметри БПЛА.

Результатом проектування будуть конструктивні параметри БПЛА, а також структура бортових систем.

Метою статі є розробка підходу до проектування БПЛА на сонячній енергії з використанням сонячних панелей застосовуючи методи багатокритеріальний оптимізації та побудови системи САПР з використання гібридної системи зберігання енергії. Заснований на математичних моделях і підході концептуального проектування розробленому в [4] з удосконаленням математичних моделей енергетичної системи.

Для досягнення поставленої мети необхідне рішення наступних завдань:

- розробити моделі структурних елементів БПЛА на СЕ з використання ГСХЕ враховуючи параметри процедури оптимізації, імітаційні моделі, що дозволяють перевірити поведінку заданої структури БПЛА, а також формалізувати набір критеріїв;
- виконати пошук оптимальної конфігурації БПЛА ГСЕС з використанням багатокритеріальної оптимізації використовуючи генетичні алгоритми, використовуючи математичні моделі елементів.

4.2 Конструкція безпілотного літального апарату на сонячній енергії

Конструктивно БПЛА (рис. 4.1), як і звичайний літак складається з: фюзеляжу, крил і хвостового оперення, який також оснащений силовою установкою, а також, володіє певною схемою компонування.



Рис. 4.1– Компонування літака-планера

Відповідно структурно сонячний БПЛА складається з:

- корпусу БПЛА з урахуванням схеми компонування і профілю крила;
- СЕС (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).

Сонячні панелі покривають верхню частину крила літака, що відповідно утворює багато різних кутів падіння сонячних променів на сонячні модулі.

При конструюванні безпілотного літального апарату використовується адаптована версія СЕУ по вазі і розмірам. Зв'язок та інтеграція підсистем БПЛА з підсистемами СЕУ показана на рис. 4.2.

СЕУ забезпечує перетворення сонячної енергії для бортової мережі безпілотного літального апарату і забезпечує належні рівні енергії для безперервної роботи електричного обладнання, включаючи зарядку акумулятора, а також контрольовану енергетичну підтримку корисною навантаження.

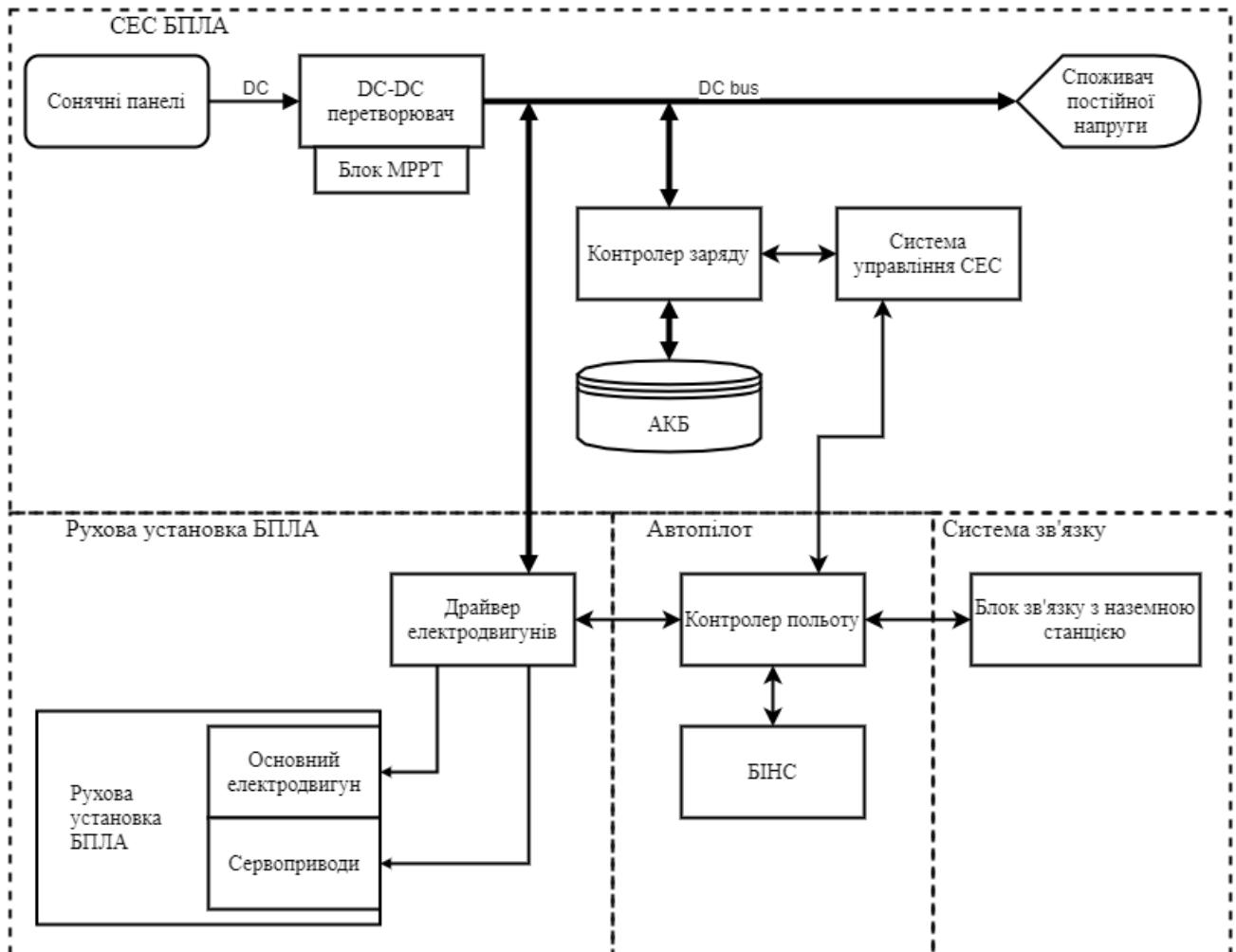


Рис. 4.2– Структура сонячного БПЛА

4.3 Система автоматизованого проектування безпілотного літального апарату на сонячній енергії

Однією з основних цілей цієї роботи і концептуального проектування є розробка системи САПР. САПР - це система, яка містить набір блоків, де кожний блок являє собою набір моделей, конфігурацій, програмного та алгоритмічного забезпечення для вирішення завдання концептуального проектування, а також можливість перевірки результатів.

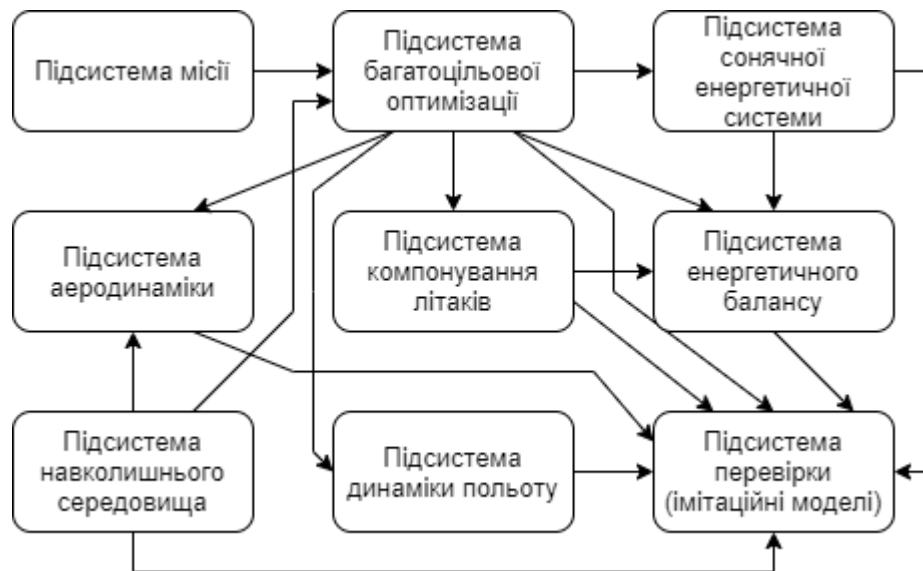


Рис. 4.3– Структура сонячного БПЛА.

Структура САПР, а також взаємозв'язок блоків показана на рис. 4.3, розглянемо кожен з блоків більш докладно:

Підсистема місії. Цей блок дозволяє введення користувачем конфігурації польоту, цілі, які будуть встановлені перед БПЛА, щоб спрямувати процес проектування для вирішення прикладних завдань. Параметри, з якими працює це пристрій: маса корисного навантаження, споживана потужність, тип місії, а також очікуваний тип маршруту та критичні точки (політ з точки А в точку В, політ з поверненням або без, круговий політ, круговий політ по шляхових точках і т. д.).

Підсистема навколишнього середовища. Цей блок є введенням користувачем очікуваної інформації про умови навколишнього середовища, у яких буде літати БПЛА. Параметри, з якими працює пристрій: час року, а також діапазон робочих дат, очікувані погодні умови (в якості альтернативи може використовуватися історична база даних, на основі якої буде виходити припущення про погодні умови).

Підсистема сонячної енергії. Цей блок являє собою модель сонячної електростанції, у тому числі містить власну САПР, для розрахунку і проектування адаптованих SPS для сценарію використання. Вхідні параметри: специфікація вимог до основних вузлів і підсистем СЕУ (сонячні панелі, ШІМ або МРРТ, зберігання, вимоги до навантаження і т. Д.). Вихідні параметри: специфікація

адаптованого SPS (тип і потужність сонячних панелей, конфігурація підключення, очікувані технічні характеристики вузлів, діапазон робочих напруг, а також генеруюча потужність).

Багатоцільова підсистема оптимізації. Цей блок є підсистемою багатокритеріальної оптимізації, в якій процес оптимізації багатьох цільових функцій запускається в умовах заданих обмежень. Відповідно, проблема пошуку оптимальної конфігурації БПЛА вирішується з урахуванням багатьох чинників, таких як: специфіка польоту, особливості навколишнього середовища і час польоту, а також додаткові користувальницькі обмеження за вагою, розмірами і т. д.

Підсистема аеродинаміки. Цей блок є підсистемою для розрахунку аеродинамічної складової БПЛА, такий як коефіцієнти опору і підйомної сили.

Підсистема динаміки польоту. Цей блок є підсистемою динаміки польоту сонячного літака, яка буде використовуватися для налаштування системи валідації і розрахунку параметрів механіки польоту.

Підсистема компонування літака. Цей блок використовується в якості підсистеми розрахунку макета.

Підсистема енергетичного балансу. Цей блок є підсистемою для розрахунку та оцінки енергетичних потреб БПЛА в контексті доступною сонячної енергії та енергії, що генерується SES.

Підсистема валідації (імітаційне моделювання). Це набір імітаційних моделей БПЛА, включаючи аеродинамічну модель літака, навігаційну систему, зконфігуровану для польоту, енергетичну модель літака, компонування, модель навколишнього середовища, а також модель доступного сонячного випромінювання. Виконує моделювання, аналізує кілька днів польоту налаштованого БПЛА для генерації звіту по всім бортовим підсистемам, включаючи енергетичну.

Проектування безпілотного літального апаратуз використанням сонячної енергетичної системи

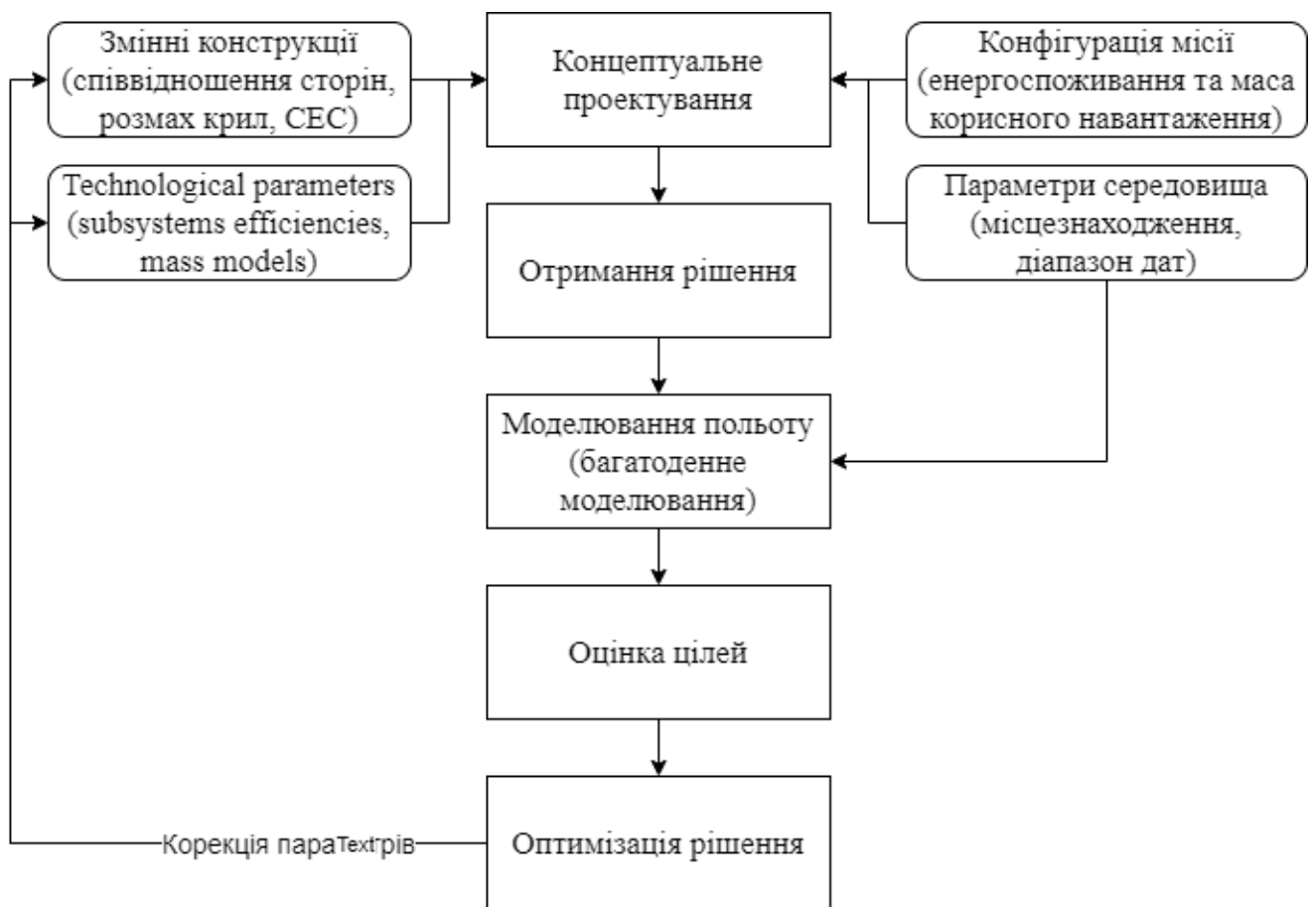


Рис. 4.4– Цикл проектування БПЛА з СЕУ

Опорною точкою є концепція безперервного польоту, виходячи з цього, формується концепція енергетичного балансу: балансу мас і балансу енергії: баланс ваги передбачає, що підйомна сила повинна компенсувати сумарний вага літака і повинна бути врівноваженою; енергетичний баланс являє собою деякі значення доступною сонячної енергії протягом дня, що збирається сонячними батареями, розміщеними на борту, яка повинна дорівнювати або перевищувати значення споживаної енергії на всіх енергетичних вузлів літака (рис 4.4).

Запропонована методологія концептуального проектування в роботі [4] являє собою наступний вигляд:

1. формується вираження необхідної потужності БПЛА за умови безперервного горизонтального польоту;
2. будується вираз доступною сонячної енергії в перебігу дня;

3. розроблені вагові моделі, дозволяють замкнути цикл пошуку аналітичного рішення задачі проектування.

Розширення концептуального проектування БПЛА з СЕС полягає в тому, що СЕС доповнюється гібридною системою зберігання та накопичення енергії (HESS).

Модель маси БПЛА, яка враховує всі основні підсистеми БПЛА, запропонована в роботі [4] має наступний вигляд:

$$m = m_{av} + m_{pld} + m_{af} + m_{sc} + m_{mppt} + m_{storage} + m_{prop},$$

де: m_{av} - маса авіоніки; m_{pld} - маса корисного навантаження, m_{af} - маса корпусу літака, m_{sc} - маса сонячних панелей, m_{mppt} - маса контролера МППТ, m_{bat} - маса АКБ, m_{prop} - маса рухової групи.

Вводиться HESS з використанням акумуляторних батарей і суперконденсаторів:

$$m_{storage} = N_{sc}m_{sc}k_{storage} + N_{bat}m_{bat}(1 - k_{storage}),$$

де $k_{storage}$ – коефіцієнт розподілу маси між суперконденсаторами та АКБ.

Побудова гібридних систем зберігання та накопичення енергії

Завдання визначення розміру елементів накопичення HESS, полягає в тому, щоб знайти оптимальне кількість елементів HESS, а саме акумуляторних батарей (N_{bat}) і суперконденсаторів (N_{sc}), при умові мінімізації ваги 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.

Існує безліч досліджень розміру системи зберігання, у тому числі і на основі зв'язки АКБ і суперконденсаторів [6, 8].

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

Мінімізувати $f(N_{bat}, N_{sc})$,

при обмеженнях

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

$$\begin{aligned}
N_{sc}P_{sc}^{max} &\geq P_{sc}(t), \\
N_{bat}P_{bat,one} &\geq P_{load}, \\
N_{bat}P_{bat,one} + N_{sc}P_{sc,one} &\geq P_{load}^{max}, \\
N_{bat}E_{bat,one} + N_{sc}E_{sc,one} &\geq E_{load}^{max}, \\
P_{sc}^{min} &\leq P_{sc}(t) \leq P_{sc}^{max}, \\
P_{bat}^{min} &\leq P_{bat}(t) \leq P_{bat}^{max}, \\
SOC_{bat}^{min} &\leq SOC_{bat}(t) \leq SOC_{bat}^{max}, \\
SOC_{sc}^{min} &\leq SOC_{sc}(t) \leq SOC_{sc}^{max}.
\end{aligned}$$

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

$$P_{load}(t) = P_{bat}(t) + P_{sc}(t).$$

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

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

Зв'язок енергії з напругою:

$$\begin{aligned}
E_{sc}(t) &= \frac{CV_{sc}^2(t)}{2}, \\
E_{sc}^{min} &\leq E_{sc}(t) \leq E_{sc}^{max}, \\
P_{sc}^{min}(t) &\leq P_{sc}(t) \leq P_{sc}^{max}(t).
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
P_{sc}^{min} &= V_{sc}I_{sc}^{min}, \\
P_{sc}^{max} &= V_{sc}I_{sc}^{max}.
\end{aligned}$$

Для рішення задачі оптимізації і синтезу підсистеми багатокритеріальної оптимізації для автоматизованої системи проектування був використаний метод удосконаленого алгоритму еволюції Парето (SPEA2 [2]). Цей метод

zareкомендував себе для вирішення проблем цього типу і є поліпшеним варіантом методу з тим же ім'ям.

Основною метою алгоритму SPEA2 є підтримка та пошук рішень у вигляді парето-оптимального безлічі.

Основними відмінностями SPEA2 по порівнянні з SPEA є:

- використовується покращена схема призначення фітнесу, яка враховує для кожного людини, скільки людина домінує і над чим він домінує;
- включена методика оцінки щільності найближчих сусідів, яка дозволяє більш точно орієнтуватися в процесі пошуку;
- нові методи скорочення архіву гарантують збереження граничних рішень.

Багатокритеріальна оптимізація була виконана для вхідних параметрів, які представлені в таблиці 4.1 із зменшеним набором критичних параметрів.

Таблиця 4.1
Проектні параметри

Час початку	1 / серпень / 2019 р.
Час закінчення	1 / сент. / 2019 р.
Розташування	Київ, Україна
Цільова висота	100 м
Ефективність сонячних елементів	0,18
Конфігурація сонячної енергії eff	0,95
ККД МРРТ	0,98
Вихідна батарея SoC	Повна
зарядка / розрядка Ефективність	0,98
Потужність Корисна навантаження	0.5 W

Рішення які були знайдені допомогою багатокритеріальної оптимізації підсистеми наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Параметри літака

Загальна маса	2,8 кг
розмах крила	3.4 m ²
Endurance	25h
Круїзний потужність	17W
Solar Cells площа	0,75 m ²
Ємність батареї	150 Втч.
Швидкість (набір висоти)	0,1 м / с
Потужність (набір висоти) 20	Вт
Потужність Avionics	2,5 Вт
Потужність корисної навантаження	0,5 Вт

Інструмент аналізу, розроблений в Simulink, використовується як вхідні параметри характеристики середовища польоту, часу запуску, а також параметри БПЛА. Моделювання виконується за рахунок трьох базових підсистем:

- модель інтенсивності сонячного випромінювання, що представляє собою модель доступної енергії забезпечуваною сонцем;
- модель енергосистеми, яка використовується для розрахунку поточного розподілу потужності;
- модель БПЛА, яка використовується для розрахунку і відстеження фактичних параметрів польоту БПЛА.

Інструмент аналізу показаний на рис. 4.5, він представляє наступні типи блоків: вхідних параметрів та імітаційних моделей;

Входи інструменту аналізу:

- день року, коли можна почати симуляцію;
- параметри розташування, такі як довгота і широта;
- параметри площі сонячних елементів, які пов'язані з перетворенням потужності від сонячної до електричної енергії;
- параметри банку батарей, які відповідають за зберігання та надання додаткової енергії, якщо потрібно, можуть бути сконфігуровані з різним станом заряду батарей;
- параметри польоту БПЛА, які являють собою параметри спроектованого літака, такі як необхідна потужність для горизонтального польоту, параметри структури БПЛА, очікувана швидкість підйому і додаткова потужність необхідна для набору висоти, і початкова висота зльоту;
- блок вимог до потужності БПЛА, який описує потрібну додаткову потужність для системи.

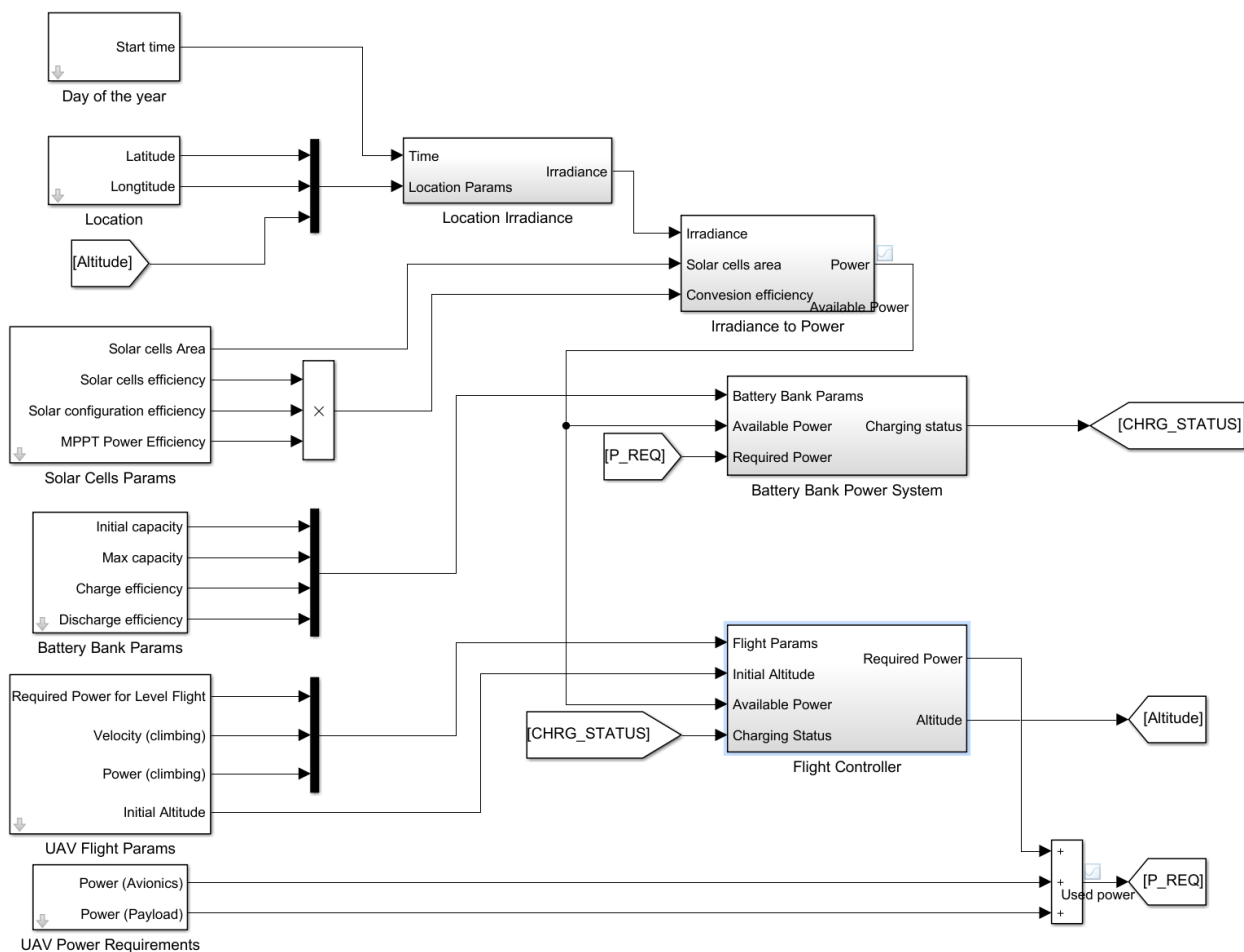


Рис. 4.5– Інструмент аналізу БПЛА в Simulink

Location Irradiance - модель освітленості, яка використовує модель Duffie & Beckman, яка може забезпечити розрахунковий рівень освітленості в залежності від часу року і поточного географічного положення;

Irradiance to Power, який забезпечує можливість перетворення фактичного рівня освітленості з використанням масиву сонячних елементів з його певним параметрам (ефективність сонячних елементів і його ефективність конфігурації) і ефективність блоку MPPT;

Battery Bank Power System, яка являє собою сховище енергії, імітує систему управління живленням, яка може прийняти рішення в залежності від стану заряду батарей для зарядки або немає. Оскільки входи управляють параметрами як доступною потужністю та необхідною потужністю для польоту, і можуть забезпечити різницю при потужності під час фази розряду. Оскільки внутрішній стан забезпечує поточний стан заряду і надлишок енергії;

Flight Controller - самий складний блок, він налаштований параметрами польоту і забезпечує логіку використання стратегії сходження (утримуючи висоту або збільшуючи енергію в якості потенційної енергії), враховуючи поточний статус зарядки. Забезпечує як поточну висоту, так і потужність.

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

Параметри моделювання були обрані для середнього БПЛА, який міг забезпечити теоретичний безперервний політ, місце в Києві, і дата використовувалася як не сама краща за денною тривалості, але протягом літа. Повний набір параметрів наведено нижче в таблиці 4.3.

Вхідні параметри моделювання

Start time	1/Aug/2018 10:00
Location	Kyiv, Ukraine
Simulated Altitude	100m
Solar cells area	0.6 m ²
Solar cells efficiency	0.18
Solar configuration eff	0.95
MPPT efficiency	0.98
Battery initial SoC	168Wh
Battery Capacity	168Wh
Charge/Discharge efficiency	0.98
Level flight power	12W
Velocity (climbing)	0.1 m/s
Power (climbing)	14W
Power Avionics	2.5 W
Power Payload	0.5 W

З результатів моделювання ми могли б добитися того, що для цих параметрів можливий безперервний політ. На рис. 4.10 порівнюється доступна потужність (являє собою потужність, отриману від сонячних елементів після перетворення в електричну), з використаною потужністю (потужність, необхідна повітряним судном для всіх систем, підключених до енергосистеми, таких як авіоніка і корисна навантаження) і потужність заряду (які являють собою потік потужності від і до батареї). На рис. 4.6 є стан заряду батареї, де показана поточна ємність.

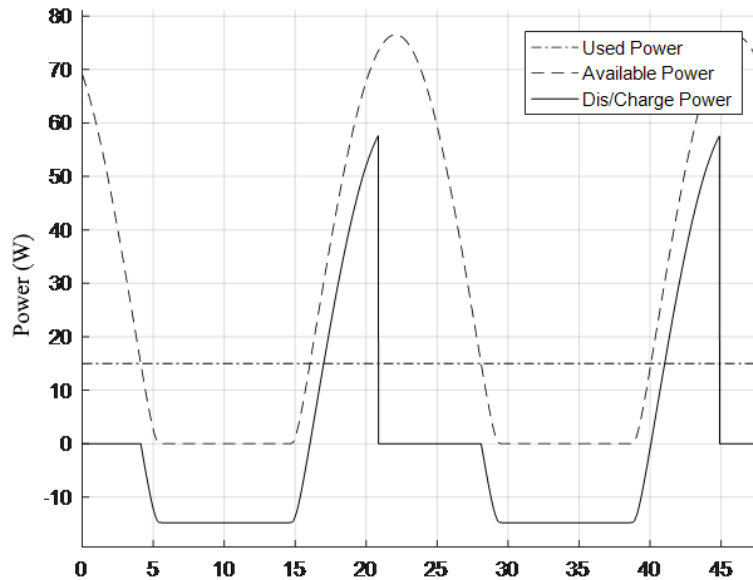


Рис. 4.6– Порівняння доступною, використаної енергії та енергії заряду АКБ

Цей імітований політ з плином часу можна було б розділити на кілька етапів:

Фаза 1: Початковий запуск і проліт при денному світлі.

На цьому етапі симуляція почалася з батареї з повною місткістю, вона показана на рисунках 4.6, заряджаючи потужність і акумулятор SoC, тут є прямі лінії. Це означає, що для цього симулированного дня і для цього часу початку можна почати з менш початкового SoC, де ми могли б додатково перезарядити акумулятор на повну потужність в нічний час.

Фаза 2: Літати в нічний час.

Нічний час польоту пов'язано з тим, що немає можливості заряджати акумулятор, цей тип польоту повністю залежить від наявності енергії від батареї. Після моделювання часу на цьому етапі ми могли проаналізувати доступний запас потужності після нічного кінця.

Етап 3: Безперервний політ.

Наступним кроком є здатність забезпечити безперервний політ, на цьому етапі для досягнення цього може бути замало показників. Перш за все, це успішно попередній етап, а секунда один, на цьому етапі при денному світлі акумулятор повинен бути заряджений достатньо для майбутнього нічного польоту. При поточної симуляції вона показана як пряма горизонтальна лінія між 21h і 28h

польоту. У цьому випадку батарею можна заряджати досить швидко, навіть до максимальної сонячної радіації.

В результаті цей інструмент моделювання міг би створити «реальну» картину льотної ефективності, з деякими ідеями, де ми могли б поліпшити деякі параметри дизайну або як ми можемо використовувати надлишкову потужність, наприклад, як показано між 21 год і 28 год польоту, є перевищення влади. Ця потужність може бути збережена шляхом збільшення висоти або може бути використана додатковими функціями корисною навантаження.

ВИСНОВКИ

В роботі обґрунтовано структуру системи автоматизованого проектування гібридних установок на сонячній енергії.

Та передбачено використання ДГ, АКБ, для роботи системи при пікових перевантаженнях.

В якості прикладу впровадження розглянуто проектування безпілотного літального апарату на сонячній енергії, результати моделювання показали високі характеристики.

Список використаних джерел до розділу 1

1. Кара-Мурза С.Г. Научная картина мира, экономика и экология. http://www.hrono.ru/libris/lib_k/есес7.html. (дата обращения 03.02.2015)
2. Перспективы развития мировой электроэнергетики до 2035 года // *Электроэнергия, передача и распределение*. 2011. № 2. С.103.
3. Tugcu, C. T., Ozturk, I. and Aslan, A. (2012) “Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth relationship revisited: Evidence from G7 countries,” *Energy economics*, 34(6), pp. 1942–1950.
4. United Nations Environment Programmed. <http://www.ecolife.ru/infos> (дата обращения 22.11.2015).
5. Инвестиции в возобновляемые источники энергии достигли рекорда. <https://lenta.ru/news/2016/01/14/investment/> (дата обращения 14.01.2016).
6. BNEF.<http://aenergy.ru/3873/> (дата обращения 18.02.2016).
7. Ali, S. and Jang, C.-M. (2020) “Optimum design of hybrid renewable energy system for sustainable energy supply to a remote island,” *Sustainability*, 12(3), p. 1280.
8. Aydin, N. Y., Kentel, E. and Sebnem Duzgun, H. (2013) “GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey,” *Energy conversion and management*, 70, pp. 90–106.
9. Bajpai, P. and Dash, V. (2012) “Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), pp. 2926–2939.
10. Chittala, P., Veeraiah, N. and Naveen, P. (2021) “Mitigation of Uncertainties in Hybrid Renewable Energy Systems,” *International Journal of Engineering and Technical Research*, 10, pp. 300–306.
11. Goel, S. and Sharma, R. (2017) “Performance evaluation of stand alone, grid connected and hybrid renewable energy systems for rural application: A comparative review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, pp. 1378–1389.

12. Lambert, T., Gilman, P. and Lilienthal, P. (2006) “Micropower System Modeling with Homer,” in *Integration of Alternative Sources of Energy*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., pp. 379–418.
13. Manwell, J. F. *et al.* (2006) “Hybrid2--a hybrid system simulation model--theory manual,” *Renewable Energy Research Laboratory, University of Massachusetts*. Citeseer.
14. Panhwar, Í., Sahito, A. R. and Dursun, S. (2017) “Designing off-grid and on-grid renewable energy systems using HOMER pro software,” *Journal of International Environmental Application & Science*, 12(4), pp. 270–276.
15. Ramli, M., Wahid, S. and Hassan, K. (2017) *A comparison of renewable energy technologies using two simulation softwares: HOMER and RETScreen*.
16. Saiprasad, N., Kalam, A. and Zayegh, A. (2018) “Comparative study of optimization of HRES using HOMER and iHOGA software,” *Journal of scientific and industrial research*. Available at: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/45489> (Accessed: March 3, 2021).
17. Thevenard, D., Leng, G. and Martel, S. (2002) “The RETScreen model for assessing potential PV projects,” in *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 2000 (Cat. No.00CH37036)*. IEEE, pp. 1626–1629.

Список використаних джерел у розділу 2

1. Marion, B. (2017) “Numerical method for angle-of-incidence correction factors for diffuse radiation incident photovoltaic modules,” *Solar energy (Phoenix, Ariz.)*, 147(C), pp. 344–348.
2. Lynden, S. L. (2015) *A Simulated annealing global maximum power point tracking method for photovoltaic systems experiencing non-uniform environmental conditions*. University of Tasmania.
3. Khalid, M. (2019) “A review on the selected applications of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for microgrids,” *Energies*, 12(23), p. 4559.

4. Darbali-Zamora, R. *et al.* (2018) “Viability assessment of a real-time simulation model for a residential DC microgrid network to compensate electricity disturbances in Puerto Rico,” in *2018 IEEE ANDESCON*. IEEE, pp. 1–6.

5. *Generic battery model - Simulink* (no date) *Mathworks.com*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html> (Accessed: March 1, 2021).

6. *Implement generic supercapacitor model - Simulink* (no date) *Mathworks.com*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/supercapacitor.html> (Accessed: March 1, 2021).

Список використаних джерел у розділу 3

1. Farret, F. A., & Godoy Simoes, M. (2017). *Integration of renewable sources of energy* (2nd ed.). Nashville, TN: John Wiley & Sons.

2. Aziz, A., Tajuddin, M., Adzman, M., Ramli, M., & Mekhilef, S. (2019). Energy management and optimization of a PV/diesel/battery hybrid energy system using a combined dispatch strategy. *Sustainability*, *11*(3), 683. doi: <https://doi.org/10.3390/su11030683>

3. Zheng, X.-K., Li, K., Wang, R., & Zhang, T. (2017). Operation management of a hybrid renewable energy systems base on multi-objective optimal under uncertainties. *2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*. IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/icei.2017.18>

4. Ma, G., Xu, G., Chen, Y., & Ju, R. (2017). Multi-objective optimal configuration method for a standalone wind–solar battery hybrid power system. *IET Renewable Power Generation*, *11*(1), 194-202. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0646>

5. Song, Y., Liu, Y., Wang, R., & Ming, M. (2019). Multi-objective configuration optimization for isolated microgrid with shiftable loads and mobile energy storage. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, *7*, 95248-95263. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2928619>

6. Upadhyay, S., & Sharma, M. P. (2014). A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *38*, 47-63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.057>

7. Abedini, M., Moradi, M. H., & Hosseinian, S. M. (2016). Optimal management of microgrids including renewable energy sources using GPSO-GM algorithm. *Renewable Energy*, 90, 430-439. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.014>
8. Delgado, C., & Dominguez-Navarro, J. A. (2014). Optimal design of a hybrid renewable energy system. *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ever.2014.6844008>
9. Bernal-Agustín, J. L., & Dufo-López, R. (2006). Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain. *Renewable Energy*, 31(8), 1107-1128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.004>
10. Caballero, F., Sauma, E., & Yanine, F. (2013). Business optimal design of a grid-connected hybrid PV (photovoltaic)-wind energy system without energy storage for an Easter Island's block. *Energy*, 61(C), 248-261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.030>
11. Cho, J.-H., Chun, M.-G., & Hong, W.-P. (2016). Structure optimization of stand-alone renewable power systems based on multi object function. *Energies*, 9(8), 649. doi: <https://doi.org/10.3390/en9080649>
12. Eriksson, E. L. V., & Gray, E. M. (2017). Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems – A critical review. *Applied Energy*, 202, 348-364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.132>
13. Singh, R., & Bansal, R. C. (2019). Optimization of an autonomous hybrid renewable energy system using reformed electric system cascade analysis. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(1), 399-409. doi: <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2867626>
14. Hosseinalizadeh, R., Shakouri G, H., Amalnick, M. S., & Taghipour, P. (2016). Economic sizing of a hybrid (PV–WT–FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 139-150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.046>
15. Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Huda, A. S. N., & Sanusi, K. (2015). Techno-economic analysis of hybrid PV –diesel–battery and PV –wind–diesel–battery power systems for mobile BTS : the way forward for rural development. *Energy Science & Engineering*, 3(4), 271-285. doi: <https://doi.org/10.1002/ese3.71>
16. Aguiar, R., & Collares-Pereira, M. (1992). TAG: A time-dependent, авторепечії, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 49(3), 167-

174. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(92\)90068-1](https://doi.org/10.1016/0038-092x(92)90068-1)

17. Singh, R., Bansal, R. C., & Singh, A. R. (2018). Optimization of an isolated photo-voltaic generating unit with battery energy storage system using electric system cascade analysis. *Electric Power Systems Research*, 164, 188-200. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.08.005>

18. Bokopane, L., Kusakana, K., & Vermaak, H. J. (2015). Optimal energy management of an isolated electric Tuk-Tuk charging station powered by hybrid renewable systems. *2015 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*. IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/du.2015.7102981>

19. Bakhtiari, H., &Naghizadeh, R. A. (2018). Multi-criteria optimal sizing of hybrid renewable energy systems including wind, photovoltaic, battery, and hydrogen with storage ϵ -constraint method. *IET Renewable Power Generation*, 12(8), 883-892. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0706>

20. Coppitters, D., De Paepe, W., & Contino, F. (2020). Robust design optimization and stochastic performance analysis of a grid-connected photovoltaic system with storage battery and hydrogen storage. *Energy (Oxford, England)*, 213(118798), 118798. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118798>

21. Díaz, G., Gómez-Aleixandre, J., Coto, J., & Conejero, O. (2018). Maximum income resulting from energy arbitrage by battery systems subject to cycle aging and price uncertainty from a dynamic programming perspective. *Energy (Oxford, England)*, 156, 647-660. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.122>

22. Ramesh, M., &Saini, R. P. (2020). Effect of different batteries and diesel generator on the performance of a stand-alone hybrid renewable energy system. *Energy Sources Part A Recovery and Utilization Environmental Effects*, 1–23. doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1763520>

23. Yusoff, Y., Ngadiman, M. S., & Zain, A. M. (2011). Overview of NSGA-II for optimizing machining process parameters. *Procedia Engineering*, 15, 3978-3983. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.745>

24. Ming, M., Wang, R., Zha, Y., & Zhang, T. (2017). Multi-objective optimization of hybrid renewable energy system using an enhanced multi-objective evolutionary algorithm. *Energies*, 10(5), 674. doi: <https://doi.org/10.3390/en10050674>

25. Nujoom, R., Wang, Q., & Mohammed, A. (2018). Optimisation of a sustainable manufacturing system design using the multi-objective approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5-8), 2539-2558. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1649-y>

26. Ramaprabha, R, Mathur, BL. A Comprehensive review and analysis of solar photovoltaic array configurations under partial shaded conditions. *International Journal of Photoenergy* 2012; 2012. DOI: 10.1155/2012/120214

27. Rossi, D, Omana, M, Giaffreda, D, Metra, C. Modeling and detection of hotspot in shaded photovoltaic cells. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* 2015; 23(6): 1031-1039, DOI: 10.1109/TVLSI.2014.2333064
28. Ahmad, R, Murtaza, AF, Sher, HA. Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019; 101: 82–102, DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.015
29. Balasubramanian, IR, Ilango Ganesan, S, Chilakapati, N. Impact of partial shading on the output power of PV systems under partial shading conditions. *IET Power Electronics* 2014; 7(3): 657–666, DOI: 10.1049/iet-pel.2013.0143
30. Chen, K, Tian, S, Cheng, Y, Bai, L. An improved MPPT controller for photovoltaic system under partial shading condition. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2014; 5(3): 978–985, DOI: 10.1109/TSTE.2014.2315653
31. Tey, KS, Mekhilef, S. Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2014; 61(10): 5384–5392, DOI: 10.1109/TIE.2014.2304921
32. Bouselham, L, Hajji, M, Hajji, B, Bouali, H. A new MPPT-based ANN for photovoltaic system under partial shading conditions. *Energy Procedia* 2017; 111: 924–933, DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.255
33. Chin, CS, Chin, YK, Chua, BL, Kiring, A, Teo, KTK. Fuzzy logic based MPPT for PV array under partially shaded conditions. *International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies (ACSAT)* 2012; 133–138, DOI: 10.1109/ACSAT.2012.46
34. Rezk, H, Fathy, A. Simulation of global MPPT based on teaching–learning-based optimization technique for partially shaded PV system. *Electrical Engineering (Berlin. Print)* 2017; 99(3): 847–859, DOI: 10.1007/s00202-016-0449-3
35. Farzaneh, J, Keypour, R, Khanesar, M. A New maximum power point tracking based on modified firefly algorithm for PV system under partial shading conditions. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 2018; 3(1): 1-13, DOI: 10.1007/S40866-018-0048-7
36. Sundareswaran, K, Sankar, P, Nayak, PSR, Simon, SP, Palani, S. . Enhanced energy output from a PV system under partial shaded conditions through artificial bee colony. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2015; 6(1): 198–209, DOI: 10.1109/TSTE.2014.2363521
37. Liu, YH, Huang, SC, Huang, JW, Liang, WC. A particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2012; 27(4): 1027–1035, DOI: 10.1109/TEC.2012.2219533
38. Ishaque, K, Salam, Z. A deterministic particle swarm optimization maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition. *IEEE Transactions on Industrial*

39. Chauhan, U, Singh, V, Kumar, B, Rani, A. An improved MVO assisted global MPPT algorithm for partially shaded PV system. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 2020; 38(5): 6715–6726, DOI: 10.3233/JIFS-179749
40. Jiang, LL, Maskell, DL, Patra, JC. A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions. *Energy and Buildings* 2013; 58: 227–236, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.12.001
41. Daraban, S, Petreus, D, Morel, C. A novel MPPT (maximum power point tracking) algorithm based on a modified genetic algorithm specialized on tracking the global maximum power point in photovoltaic systems affected by partial shading. *Energy (Oxford, England)* 2014; 74: 374–388, DOI: 10.1016/j.energy.2014.07.001
42. Lyden, S, Haque, ME. A simulated annealing global maximum power point tracking approach for PV modules under partial shading conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2016; 31(6): 4171–4181, DOI: 10.1109/TPEL.2015.2468592
43. Jantsch, M, Real, M, Haeberlin, H, Whitaker, C, Kurokawa, K, Blaesser, G, Kremer, P, Verhoeve, CV. Measurement of PV maximum power point tracking performance. *14th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition* 1997.
44. Islam, H, Mekhilef, S, Shah, NBM, Soon, TK, Seyedmahmousian, M, Horan, B, Stojcevski, A. Performance evaluation of maximum power point tracking approaches and photovoltaic systems. *Energies* 2018; 11(2): 365, DOI: 10.3390/en11020365
45. Raghavendra, KVG, Zeb, K, Muthusamy, A, Krishna, TNV, Kumar, SVSVP, Kim, DH, Kim, MS, Cho, HG, Kim, HJ. A Comprehensive review of DC–DC converter topologies and modulation strategies with recent advances in solar photovoltaic systems. *Electronics* 2019; 9(1): 31, DOI:10.3390/electronics9010031
46. Ma, J, Man, KL, Ting, TO, Zhang, N, Guan, SU, Wong, PWH. Approximate single-diode photovoltaic model for efficient IV characteristics estimation. *The Scientific World Journal* 2013; 2013: 1-7, DOI: 10.1155/2013/230471
47. Mahmoud, Y, Xiao, W, Zeineldin, H. A Simple approach to modeling and simulation of photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2012; 3: 185-186, DOI: 10.1109/TSTE.2011.2170776
48. de Cesare, G, Caputo, D, Nascetti, A. Maximum power point tracker for portable photovoltaic systems with resistive-like load. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)* 2006; 80(8): 982–988, DOI: 10.1016/j.solener.2005.07.010
49. Piegari, L, Rizzo, R. Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking. *IET Renewable Power Generation* 2010, 4(4): 317-328, DOI: 10.1049/iet-

50. Sadollah, A, Bahreininejad, A, Eskandar, H, Hamdi, M. Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables. *Computers and Structures* 2012; 102(103): 49–63, DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.03.013

51. Sadollah, A, Eskandar, H, Bahreininejad, A, Kim, JH. Water cycle, mine blast and improved mine blast algorithms for discrete sizing optimization of truss structures. *Computers and Structures* 2015; 149: 1–16, DOI: 10.1016/j.compstruc.2014.12.003

Список використаних джерел у розділу4

1. Boucher, R. (1984) “History of solar flight,” in *20th Joint Propulsion Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

2. Kim, M. *et al.* (2004) “SPEA2+: Improving the performance of the strength Pareto evolutionary algorithm 2,” in *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 742–751.

3. Leutenegger, S. (2014) *Unmanned solar airplanes: Design and algorithms for efficient and robust autonomous operation*. ETH Zurich. doi: 10.3929/ETHZ-A-010255301.

4. Noth, A. (2008) *Design of solar powered airplanes for continuous flight*. ETH Zurich. doi: 10.3929/ETHZ-A-005745622.

5. Oettershagen, P. (2018) *Solar-powered unmanned aerial vehicles: Design and environment-aware navigation for robust low-altitude multi-day continuous flight*. ETH Zurich. doi: 10.3929/ETHZ-B-000265638.

6. Paul, T. *et al.* (2020) “Sizing of lithium-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system for forklift vehicle,” *Energies*, 13(17), p. 4518.

7. Rajendran, P. and Smith, H. (2018) “Development of design methodology for a small solar-powered unmanned aerial vehicle,” *International journal of aerospace engineering*, 2018, pp. 1–10.

8. Yu, H. *et al.* (2021) “Dimensioning and power management of hybrid energy storage systems for electric vehicles with multiple optimization criteria,” *IEEE transactions on power electronics*, 36(5), pp. 5545–5556.