

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **Підвищення енергоефективності та надійності роботи
фотоелектричних станцій**

Виконав: студент 6 курсу, групи ЕТм-61

напряму підготовки (спеціальності)

**141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

		Маланчук В.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Сисак І.М.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Коваль В.П.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри		Коваль В.П.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		Габрусєв Г.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Факультет *прикладних інформаційних технологій та електроінженерії*
(повна назва факультету)

Кафедра *електричної інженерії*
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри *Коваль В.П.*

«» 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня *магістр*
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*
(шифр і назва)

студенту *Маланчуку Валерію Володимировичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Підвищення енергоефективності та надійності роботи
фотоелектричних станцій*

Керівник роботи *Сисак Іван Михайлович, к.т.н., доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від *11 жовтня 2024 року № 4/7-988*

2. Термін подання студентом роботи *20 грудня 2024 р.*

3. Вихідні дані до роботи *Технічні параметри, тип та потужність фотоелектричних станцій, які бувають основні несправності та проблеми, типи та характеристика БПЛА, норми щодо моніторингу, обслуговування і технічного огляду.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

- 1. Аналітичний розділ.*
- 2. Розрахунково-дослідницький розділ.*
- 3. Проектно-конструкторський розділ.*
- 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

- 1. Загальний вигляд та схема роботи фотоелектричної станції.*
- 2. Розташування ключових компонентів (модулі, інвертори, система моніторингу.)*
- 3. Робота дрона під час діагностики: тепловізійна камера, зйомка високої роздільної здатності.*
- 4. Зображення процесу очищення модулів за допомогою дронів (мийні системи, щітки).*
- 5. Порівняння покращення енергоефективності завдяки точній діагностиці та очищенню.*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Гурик О.Я.</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>ст. викл. Клепчик В.М.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>к.т.н., доц. Коваль В.П.</i>		

7. Дата видачі завдання

02 вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Літературний огляд за напрямком дипломної роботи	16.09.24 – 18.10.24	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки дипломної роботи	21.10.24 – 01.11.24	
3	Підготовка розділу «Охорона праці та безпека в надзв. ситуаціях»	04.11.24 – 15.11.24	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	18.11.24 – 29.11.24	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	02.12.24 – 13.12.24	
6	Отримання відгуку та рецензії на дипломну роботу, підготовка доповіді на захист	16.12.24 – 20.12.24	

Студент

(підпис)

Маланчук В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Сисак І.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 62 сторінки. В роботі міститься 34 рисунків, 21 формула і 1 таблиця.

Наразі енергія від Сонця є однією з найбільш стійких джерел відновлювальної енергії. В умовах швидкого росту кількості сонячних електростанцій (СЕС) темпи їх обслуговування та перевірки технічного стану є важливим питанням енергетичної безпеки.

В нашій кваліфікаційній роботі ми пропонуємо для виявлення несправностей сонячних елементів залучати безпілотні літальні апарати (БПЛА).

Метою кваліфікаційної роботи є: оцінка можливості застосування БПЛА при проектуванні, роботі та технічному обслуговуванні СЕС.

Об'єктом дослідження є: сонячні електричні станції (сонячні панелі та складові елементи до них), а також процеси їх діагностики.

Предметом дослідження є: методи, алгоритми та технічні засоби виявлення несправностей сонячних елементів із використанням БПЛА, включаючи технології збору, аналізу та обробки даних.

Перелік ключових слів:

СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ, БЕЗПІЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ, МОНІТОРИНГ ЕФЕКТИВНОСТІ, ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, АЕРОФОТОЗЙОМКА.

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП.....	6
 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	 8
1.1 Передумови застосування БПЛА у цивільних цілях.....	8
1.2 Галузі застосування БПЛА	11
1.3 Застосування БПЛА для моніторингу об'єктів енергетики.....	17
1.4 Висновки до розділу 1	24
 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	 26
2.1 Опис об'єкта дослідження	26
2.2 Конфігурація системи.....	27
2.3 Проведення польових досліджень.....	30
2.4 Висновки до розділу 2	40
 3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	 41
3.1 Розробка моделі роботи БПЛА.....	41

3.1.1 Сила тяги та потужність, що забезпечуються двигунами.....	41
3.1.2 Аеродинамічний опір.....	42
3.1.3 Баланс сил.....	44
3.1.4 Витрати енергії.....	46
3.2 Застосування генетичного алгоритму для оптимізації маршруту.....	47
3.3 Висновки до розділу 3.....	49
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ....	51
4.1 Інструкція з безпечної експлуатації та технічного обслуговування безпілотників (БПЛА).....	51
4.2 Вимоги з технічної безпеки щодо експлуатації сонячного обладнання	53
4.3 Надзвичайні ситуації в електроенергетичних системах	55
4.4 Організація робіт з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій в електроенергетичних системах.....	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	60

ВСТУП

Актуальність теми. Застосування сонячних фотоелектричних панелей є ключовим завданням у революції чистої енергії. За останні 10 років глобальна встановлена потужність сонячної енергії збільшилася на приголомшливі 1454 % - з усього лише 40 ГВт у 2010 році до приблизно 585 ГВт у 2023 році. За прогнозами у світі до кінця 2024 році цей показник повинен зрости до понад 1400 ГВт.

Щоб задовольняти ці вимоги, розміри та потужність сонячних електростанцій (СЕС) також повинні зростати у геометричній прогресії. Однак таке масштабування призводить до проблем. Для того щоб підтримувати продуктивність та роботу СЕС на піку ефективності, операторам необхідно регулярно проводити огляди сонячних панелей, перевіряючи їх на наявність пошкоджень або бруду, що приводить до зниження ефективності та, як наслідок, рентабельності електростанцій.

Якщо раніше з цим можна було впоратися в ручну то враховуючи розміри сучасних СЕС це рішення більше не є фінансово життєздатним. Отже актуальність застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для обслуговування сонячних електростанцій обумовлена кількома ключовими факторами:

1. Ефективність діагностики.

БПЛА оснащені камерами високої роздільної здатності, тепловізорами та іншими сенсорами, які можуть швидко виявити несправності, зокрема гарячі точки які свідчать про пошкодження.

2. Оперативність.

На великих сонячних електростанціях панелі часто розташовані на значних площах, включаючи важкодоступні місця. Використання БПЛА значно полегшує перевірку таких зон, оскільки дрони можуть літати над складним рельєфом без необхідності залучення важкої техніки чи ризику для персоналу. Це забезпечує оперативний доступ до панелей і швидке виявлення потенційних

несправностей у будь-якій частині електростанції, незалежно від місця їх розташування.

3. Безпека та зниження витрат.

Використання дронів зменшує потребу у більшій кількості персоналу та дорогому забезпеченні для огляду панелей (наприклад, підіймачів чи кранів).

Огляд панелей за допомогою БПЛА знижує ризики для технічного персоналу.

4. Моніторинг та профілактика

БПЛА дають можливість проводити регулярний моніторинг стану панелей, виявляючи наявні несправності до того, як вони переростають у серйозні проблеми

Загалом, БПЛА стають ефективним інструментом, що дозволяє оптимізувати роботу сонячних електростанцій, підвищити їхню надійність та зміню. Застосування дронів підтримує сучасні тенденції автоматизації обслуговування, інтегруючи дані отримані дані у системи управління.

Об'єктом дослідження є: сонячні електричні станції (сонячні панелі та складові елементи до них), а також процеси їх діагностики.

Предметом дослідження є: методи, алгоритми та технічні засоби виявлення несправностей сонячних елементів із використанням БПЛА, включаючи технології збору, аналізу та обробки даних.

Апробація роботи. Маланчук В.В. Підвищення енергоефективності та надійності роботи фотоелектричних станцій / І.М. Сисак, В.І. Гетманюк, В.В. Маланчук // Збірник тез доповідей. Матеріали XIII міжнародної науково - технічної конференції «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 11 - 12 грудня 2024р.) / М-во освіти і науки України, Тернопільський нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя – Т.: ТНТУ, 2024.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, переліку посилань (24 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 62 сторінки, 21 формула, 1 таблиця і 34 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Передумови застосування БПЛА у цивільних цілях

Нові технології є обов'язковим компонентом успішного економічного обґрунтування при використанні традиційних та нових секторів економіки, викликаючи зростання виробництва та продуктивності. Ці технології пов'язані не тільки з видобутком, переробкою та виробництвом, але й зі збиранням, обробкою, аналізом даних та застосуванням нових методів управління.

Національна економіка України, як і інших країн з аналогічною економікою, значною мірою залежить від корисних копалин, що видобуваються. Проте розвідані запаси виснажуються. Стійкий розвиток економіки вимагає переходу на нові методи та технології господарювання, залучення до господарського обігу інших значних багатств, які має Україна (сільськогосподарська продукція, тваринництво, нові родовища корисних копалин, тощо).

Недостатнє поширення сучасних технологій, високий рівень зношення та низький технологічний рівень основних фондів призвели до зниження валового накопичення основного капіталу з 30% ВВП у 2007 році до 23,3% у 2016 році; це стримує зростання продуктивності праці. Державні програми розвитку цифрових технологій повинні сприяти прискоренню темпів розвитку економіки України.

У той же час успіхи в галузі сільськогосподарського виробництва, тваринництва, промисловості, управління міським господарством зазвичай пов'язані зі збиранням та практичним застосуванням великих обсягів даних та об'єктів з метою моніторингу та управління процесами. Багато з цих завдань збір даних пов'язані з аналізом місцевості. Ці дані можуть збиратися за допомогою стаціонарних систем, плат-форм з низькою мобільністю (наприклад, за допомогою автомобілів) та кількох типів високомобільних платформ (космічні апарати, аерофотозйомка, безпілотні літальні апарати (БПЛА)). Серед перерахованих технологій БПЛА мають дуже серйозні переваги в отриманні

даних малого та частково середнього масштабу з точки зору ефективності, вартості та дозволу.

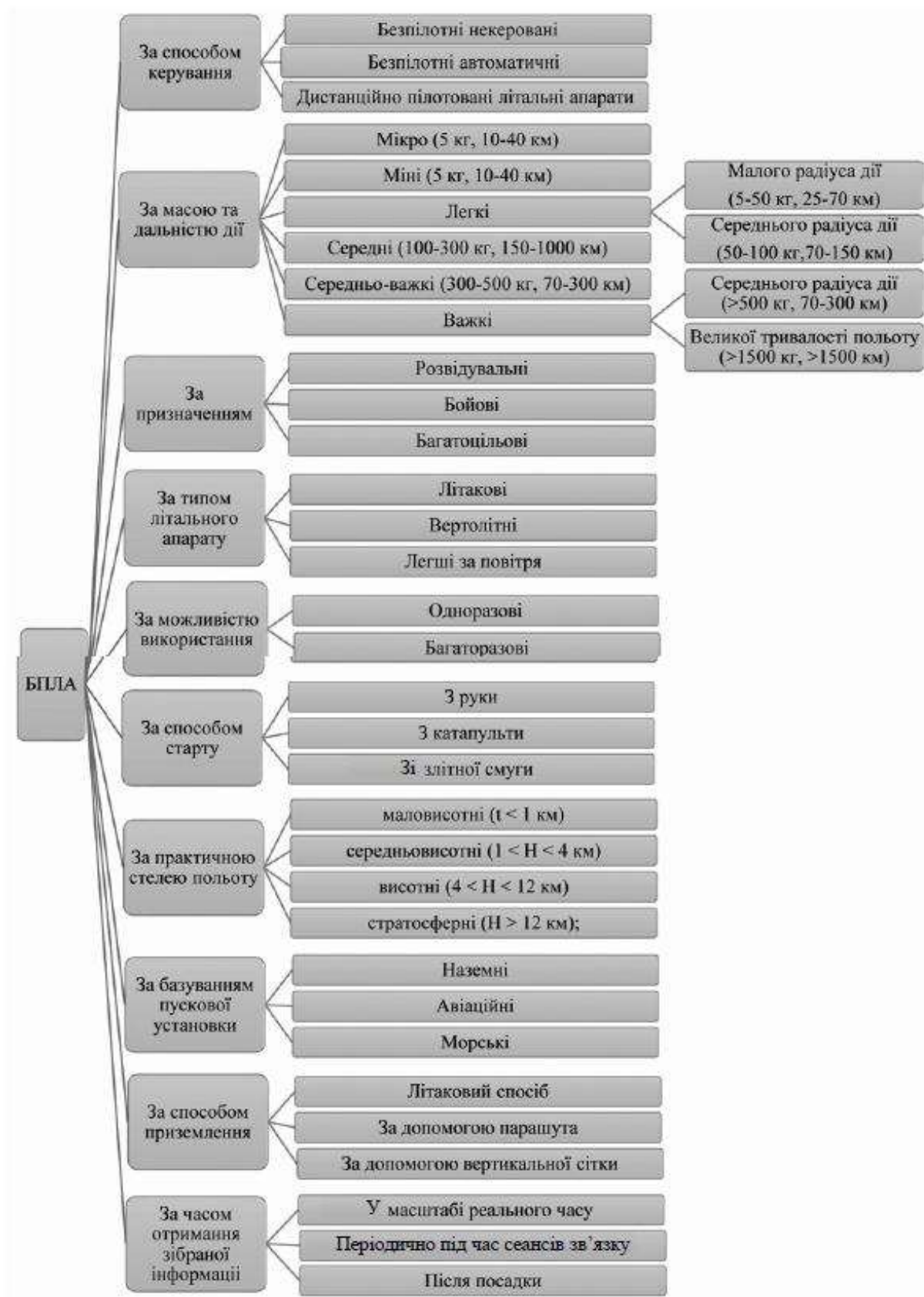


Рисунок 1.1 – Класифікація БПЛА



Рисунок 1.2 – Класифікація БПЛА за способом застосування

Використання таких даних є актуальним для інженерів та інших фахівців які мають справу з просторово-розподіленими природними або технічними системами. До таких систем належать енергетика, сільське господарство, розвідка та видобуток корисних копалин, геоекологічні системи, технічні та архітектурні споруди, тваринництво, транспорт тощо.

Керування БПЛА та використання потенціалу великих обсягів зібраних даних реалізується за допомогою технологій штучного інтелекту. У зв'язку з цим комплекс рішень, що поєднує системи штучного інтелекту та платформи на базі БПЛА, називається інтелектуальною технологією безпілотних літальних апаратів (IUAVT).

Слід зазначити, що якість алгоритмів та програмних продуктів для обробки даних досягла високого рівня. Більшість сучасних продуктів, у тому числі і для обробки великих даних, доступні, можуть бути освоєні та застосовані на практиці. Обчислювальні ресурси також не можна вважати критичним перешкодою для вирішення завдань обробки даних. Існує також можливість використання ресурсів суперкомп'ютерів або графічних процесорів у поєднанні з методами машинного навчання, що застосовуються на практиці.

Таким чином, з одного боку, складні та ефективні обчислення є предметом передових наукових досліджень. З іншого боку, ці обчислення є повністю технічно безпечними і широко використовуються в областях зі значними джерелами даних, наприклад, в галузі медицини.

Далі, ми розглянемо економічні та технологічні передумови для використання систем збору даних на базі БПЛА для вирішення певних задач у цивільних цілях суспільства, а саме у таких важливих галузях життєдіяльності людини, як енергетика.

1.2 Галузі застосування БПЛА

Використання БПЛА оснащених комплексом аналітичного, спектрометричного та гаммарадіометричного обладнання та камерами різних спектральних діапазонів з подальшою автоматичною обробкою зібраних даних, є однією з перспективних практик вирішення завдань моніторингу.

Приблизний розрахунок показує, що для проведення моніторингу з використанням вертолітної техніки у важкодоступних умовах гірської місцевості Україні необхідно близько 650 тисяч доларів, тоді як використання БПЛА вимагатиме від 17 до 170 тисяч доларів залежно від вартості БПЛА та обладнання. Зниження витрат за рахунок попередження надзвичайних ситуацій на прикладі щорічних паводків на 5% дасть додаткову економію у розмірі 10 млн. грн. доларів. Запобігання збиткам від селевих потоків може становити сотні мільйонів доларів.

Технічні та інженерні споруди у нових умовах потребують нових підходів у вирішенні експлуатаційних завдань. Ці підходи активно досліджуються в рамках парадигми промислового інтернету речей (Industrial Internet of Things - IIoT).

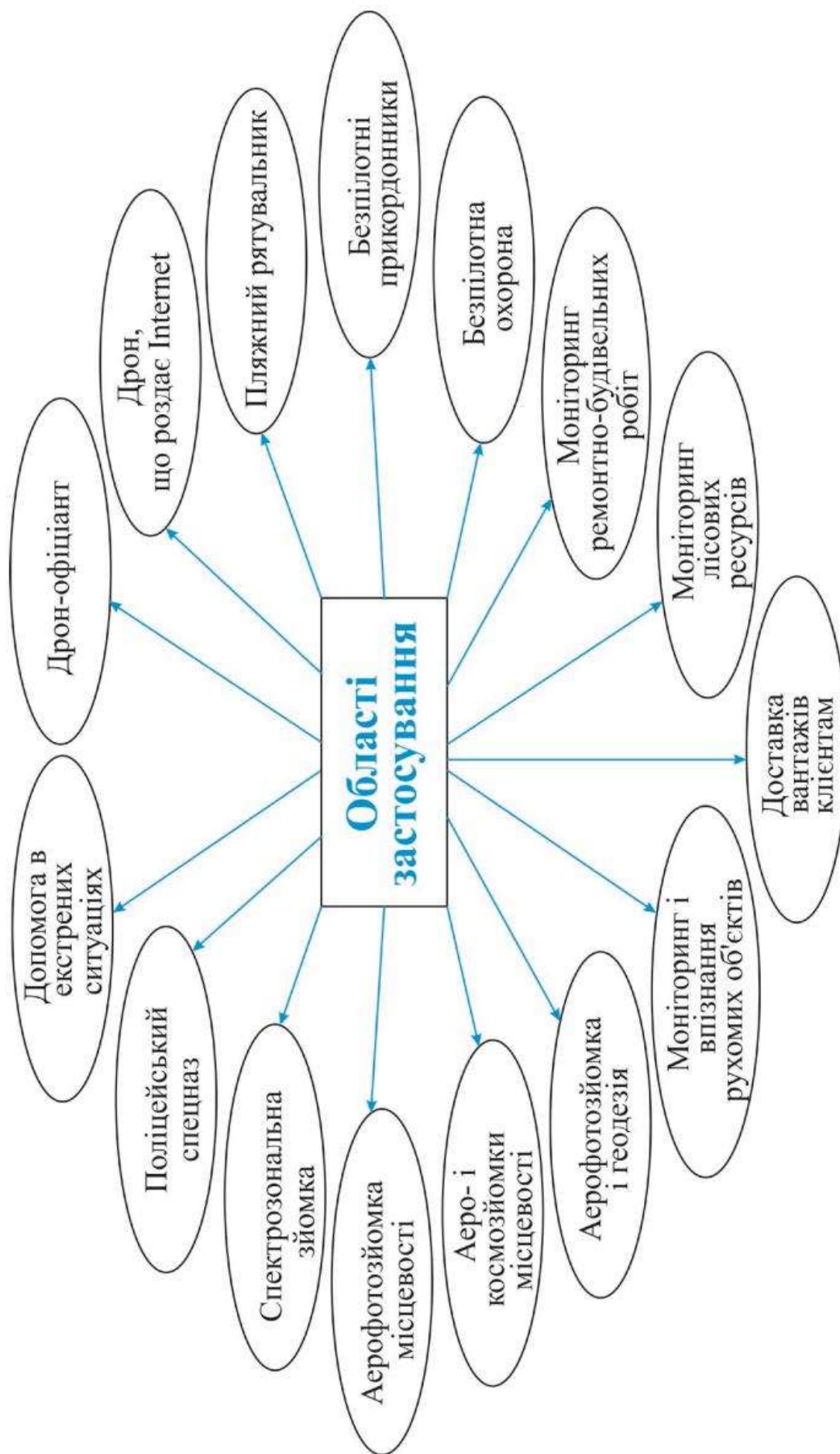


Рисунок 1.3 – Галузі застосування БПЛА

Області застосування: транспортні системи та транспортні засоби, сільськогосподарські системи та машини, гірничодобувна промисловість та пов'язане з нею обладнання, будівництво, будинки та системи, що забезпечують безпечне середовище проживання, такі як протипожежне обладнання, медичні прилади та товари особистого користування тощо.

БПЛА використовуються у будівництві для контролю процесу, побудови тривимірних моделей, контролю безпеки та оцінки збитків. Використання БПЛА для обслуговування інформаційної системи будівлі має великі перспективи. Незважаючи на зазначені обмеження (труднощі з навігацією та польотом між будівлями), рисунок 1.3.



Рисунок 1.3 – Аерофотозйомка об'єктів з допомогою БПЛА

Для збору інформації про стан обладнання та конструкцій застосовуються БПЛА. Їх застосування особливо виправдане у важкодоступних місцях (напри-



Рисунок 1.4 – Використання БПЛА у важкодоступних місцях (наприклад, лопаті вітрогенераторів) і протяжних ділянок (наприклад ліній електропередач). Рисунок 1.5.



Рисунок 1.5 – Використання БПЛА для моніторингу ЛЕП



Зокрема методи машинного зору розглядаються у поєднанні з глибоким навчанням для класифікації руйнування лопатей вітряних турбін чи пошкодження сонячних модулів на СЕС, рисунок 1.6.

Перевагами БПЛА є такі: можливість доступу до важкодоступних ділянок, швидке прийняття рішень, можливість використання груп БПЛА для



Рисунок 1.6 – Використання БПЛА для аероінспекції СЕС

ПЕРЕВАГИ ВИКОРИСТАННЯ ДРОНІВ ДЛЯ АЕРОІНСПЕКЦІЇ СЕС

 Візуальні та теплові зображення Дрони забезпечують ширший огляд та дають змогу отримувати цінну інформацію в режимі реального часу, включаючи теплові зображення, які допомагають виявляти потенційні проблеми, такі як теплові аномалії в осередках, лініях передачі або панелях	 Ефективність використання часу Використання дронів для огляду сонячних панелей дозволяє підвищити ефективність та економію часу. За допомогою дронів можна оглянути значно більшу площу за короткий час, порівняно з ручним оглядом	 Записи про попередні інспекції Інструмент для виявлення причин несправностей сонячних панелей. Вести записи про попередні інспекції допомагає встановити причини несправностей сонячних панелей. У деяких випадках проблеми з панелями можуть бути виправлені без заміни, але важливо відстежувати їх, щоб уникнути серйозних поломок
 Безпека та зменшення ризиків Використання дронів для аероінспекції сонячних панелей дозволяє зменшити ризик виникнення небезпечних ситуацій для людей, які проводять інспекцію вручну. Дрони можуть дістатися до важкодоступних місць та виконувати роботу безпечно та ефективно	 Економія коштів Застосування дронів для огляду сонячних панелей дозволяє зменшити витрати на працю та знизити час, необхідний для проведення інспекції	

Для моніторингу використовуються БПЛА з комплексом візуальних, ультразвукових, лазерних сканерів та тепловізорів (рисунок 1.7).



Блок апаратури
цільового спорядження
з газоаналізатором



Блок апаратури
цільового спорядження
з ТК і ТІВ



Блок апаратури
цільового спорядження
з фоторесруючим
обладнанням



Блок апаратури
цільового спорядження
з дозиметром гама-
випромінювання



**Блок фото/відео апаратури, ЦФА,
ТК, ТІВ, лазерний детектор
витоку метану**



Газоаналізатор



**Гіростабілізована оптико-
електронна система**



**Дозиметр гама-
випромінювання**



Міні ГЛС



**Вимірювач зашленості
повітря**



**Система звукового
оновлення**



Магнітометр

Рисунок 1.7 – Бортові зособи БПЛА цільового призначення

Для картографування та виявлення та зсувів використовуються БПЛА, рисунок 1.8.

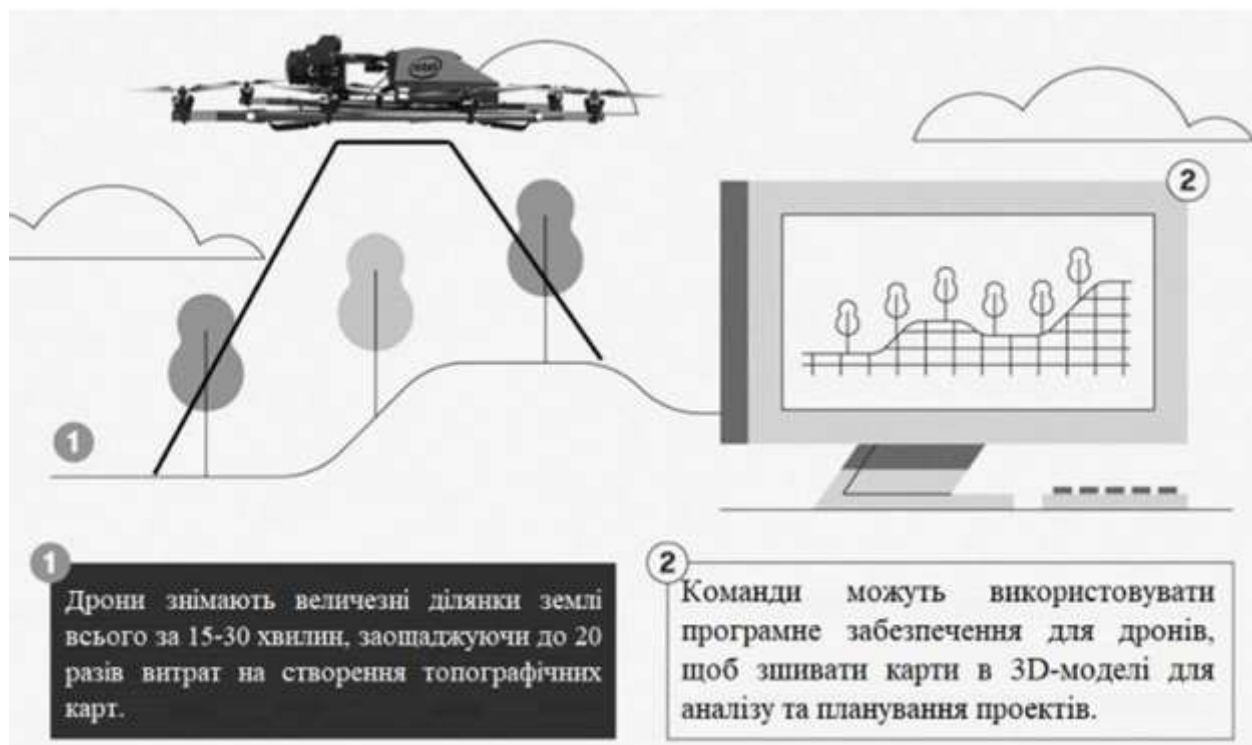


Рисунок 1.8 – Використання БПЛА для ерофотометрії

Фотографування гравітаційно-схилових процесів дозволяє чітко зафіксувати ситуацію, що склалася після формування великого стихійного лиха. Вивчення ерозійногравітаційних процесів дистанційними методами (наприклад, за допомогою БПЛА) поки не знайшло відображення в законодавчих актах, оскільки ці роботи знаходяться на початковій стадії, проте використання БПЛА для таких досліджень економічно вигідно.

1.3 Застосування БПЛА для моніторингу об'єктів енергетики

Дрони допомагають підвищувати ефективність сонячних електростанцій завдяки скороченню витрат на моніторинг обладнання та своєчасне технічне обслуговування. Безпілотники можуть застосовуватися для контролю стану вітряних турбін і обстеження високовольтних ліній електропередач. За рахунок економії ресурсів періодичність перевірок з використанням дронів можна

підвищити – це дозволить швидше та точніше визначити пошкодження, щоб усувати проблему до настання аварійної ситуації.

БПЛА набули широкого застосування в енергетиці і з кожним роком знаходять дедалі більше застосування. Однак багато фахівців висловлюються негативно з точки зору ефективності даних оглядів і особливо діагностики через необхідність отримання дозволу на політ для огляду а також необхідності підготовки ремонтних бригад з новим набором компетенцій. При цьому питання отримання дозволу носить організаційний характер і може бути вирішено.

Головним критерієм при виборі БПЛА є встановлене на нього обладнання, що визначає перелік розв'язуваних у галузі електроенергетики завдань:

- ⇒ повітряна діагностика об'єктів електромережевого господарства – повітряних ліній електропередач всіх типів, трансформаторних та інших підстанцій, розподільчих пунктів та інших об'єктів;
- ⇒ аерообстеження інженерних споруд: градирень, технологічних корпусів електростанцій, гребель гідроелектростанцій, вітроенергетичних установок, сонячних станцій;
- ⇒ огляд градирень та природних охолоджувачів електростанцій;
- ⇒ тепловізійне обстеження будівель та споруд;
- ⇒ оперативний облік стану димових труб, запас вугілля у відкритих сховищах тощо.

Маневреність БПЛА дозволяє зробити висновок про ефективність використання даного виду техніки для зовнішнього моніторингу.

Енергетичні об'єкти, щодо яких виконується огляд із застосуванням БПЛА, можна умовно поділити на три групи:

- **детальні:** окремі елементи опор, ізолятори, контактні з'єднання, фундаменти тощо.
- **групові:** безпосередньо повітряні лінії електропередач;
- **загальні:** охоронна зона.

Користувачами БПЛА можуть бути як безпосередньо внутрішні служби організацій, що експлуатують енергетичний об'єкт так і сторонні організації, що

надають послуги з діагностики та моніторингу електромережових об'єктів або виконуючі інженерні дослідження. Крім того, БПЛА можуть застосовуватися в інтересах керуючих компаній і контролюючих органів.



Рисунок 1.9 – Виявлення пошкодженого ізолятора ПЛ з допомогою БПЛА

Можливі варіанти застосування БПЛА виглядають так:

- інженерно-технічні працівники, ремонтні бригади можуть бути оснащені мультикоптерами для вирішення локальних завдань у ході чергових та позапланових оглядів, а також при виконанні АВР (поверхневий огляд, виявлення місць пошкоджень у тому числі на важкодоступних ділянках (сильно заболочена місцевість тощо));
- комплексна діагностика виконується як із застосуванням БПЛА літакового, так і мультироторного типу;
- разові роботи великого обсягу для завдань проектування, кадастру та інших аналогічних завдань виконуються за допомогою БПЛА літакового типу.



Рисунок 1.10 – Виявлення порушення охоронної зони ЛЕП

Для нестандартних завдань технічне оснащення та методи виконання робіт вибираються виходячи з економічної доцільності та технічної ефективності.

Оскільки БПЛА застосовуються в будь-яких умовах, можливе їх застосування для технічного контролю стану багатьох енергооб'єктів (рисунок 1.11), у тому числі тих, що знаходяться у віддалених районах.



а)



б) Контроль газопроводів та енергетичних об'єктів

Рисунок 1.11 – Варіанти застосування БПЛА для об'єктів обстеження енергетичного господарства

Застосування БПЛА як способу контролю за технічним станом будівель та споруд об'єктів електроенергетики дозволить значно знизити обсяг попередньої інформації для підготовки до планово-попереджувальних ремонтів.

З метою візуального обстеження БПЛА можуть застосовуватися як під час обстеження наземних споруд які побудовані на річках чи водоймах. Наприклад вітроелектростанції – можуть будуватись в прибережній зоні (рисунок 1.12) площа такої електростанції може досягати кількох десятків гектарів, а у висоту кожен вітрогенератор може досягати 200 метрів.



Рисунок 1.12 – Вітроенергетична електростанція в прибережних водах

На сьогоднішній день огляд таких електростанцій здійснюється із застосуванням водного транспорту (рисунк 1.13), що тягне за собою великі фінансові витрати, які можна знизити з застосуванням БПЛА.



Рисунок 1.13 – Обслуговування вітрогенераторів з допомогою суден

Сонячні електростанції як правило розміщуються на полях площею кілька сотень гектарів. Великі площі ускладнюють процес огляду та дефектації сонячних панелей (рисунк 1.14), у тому числі підйомом пилу від руху транспорту та погіршенням поглинаючої здатності поверхонь сонячних панелей.

Сьогодні на БПЛА можна встановити наступне обладнання:

- 1) фотообладнання;
- 2) відеообладнання;
- 3) тепловізор;
- 4) ультрафіолетову камеру;
- 5) GPS-навігатор.

В залежності від цілей та постановки завдання можна вибрати та оснастити БПЛА будь-якою кількістю обладнання, що дозволяє здійснювати контроль,

огляд та діагностику багатьох об'єктів енергетичного та іншого господарства (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Обслуговування СЕС за допомогою БПЛА



Рисунок 1.15 – БПЛА з встановленим обладнанням для зйомки

Найбільша ефективність моніторингу та діагностики за допомогою БПЛА досягається при комплексному підході, коли отримані дані обробляються та

аналізуються засобами геоінформаційного програмного забезпечення, а результуюча інформація потім використовується у системах управління підприємством. Дані аеродіагностики набувають найбільшої ефективності, будучи представленими в геоінформаційних системах та системах управління підприємством. Практично цінний результат дає технологія, яка включає час безпосередньо технічні засоби (БПЛА, оснащений певним аерознімальним обладнанням, методику виконання робіт, програмно-апаратні засоби обробки, зберігання та подання даних, метрологічне забезпечення, нормативна база.

Застосування БПЛА в енергетиці найближчими роками істотно розвиватиметься. БПЛА – це технічно складний виріб, що потребує певного рівня підготовки користувачів та культури експлуатації.

Як описано вище, універсальних систем, здатних охопити весь спектр завдань з діагностики та моніторингу не існує. Однак правильний вибір технічних засобів і обладнання є запорукою успішного вирішення розглянутих завдань. Застосування БПЛА повинно проводитись з дотриманням технології виконання робіт для обраного аерометоду діагностики. Подібних методик поки немає. Найбільша ефективність аеродіагностики за допомогою БПЛА досягається при комплексному підході, коли отримані дані обробляються і аналізуються засобами геоінформаційного програмного забезпечення, а результуюча інформація потім використовується в системах управління підприємством.

1.4 Висновки до розділу 1

На основі аналізу, викладеного в першому розділі, можна зробити наступні висновки:

1. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) є інноваційним інструментом, який забезпечує економічну ефективність і високу точність збору даних у різних галузях. Це особливо актуально для моніторингу складних об'єктів, таких як

інженерні споруди, енергетичні мережі, транспортні системи та сільське господарство.

2. Використання БПЛА значно скорочує витрати порівняно з традиційними методами, такими як вертолітні обстеження, і сприяє запобіганню потенційних збитків від природних і техногенних катастроф.

3. Здатність оснащення БПЛА різними датчиками (тепловізорами, спектрометрами, камерами) та інтеграція з геоінформаційними системами підвищує їх ефективність у вирішенні завдань діагностики, моніторингу та картографування.

4. Попри численні переваги, існують організаційні та технічні перешкоди, такі як необхідність отримання дозволів на польоти, підготовка спеціалістів та відсутність єдиних методик для різних типів обстежень.

5. Застосування БПЛА в енергетиці, будівництві та інших галузях є перспективним напрямком, який потребує подальшої стандартизації та розробки нормативно-правової бази для підвищення ефективності та безпеки їх використання.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Опис об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження нашої кваліфікаційної роботи є: процес моніторингу і діагностики фотоелектричних модулів на сонячних електростанціях.

Новизна нашої роботи полягає в тому щоб з допомогою БПЛА здійснити збір даних з СЕС та провести аналіз зображення, для якомога швидшого та точнішого виявлення аномалій сонячного модуля.

Увесь процес включає перетворення градацій сірого, фільтрацію, тривимірне представлення температури, функцію щільності ймовірності та функцію кумулятивної щільності. У цьому процесі можуть бути виявлені різні види несправностей.

Перевага нашого запропонованого методу полягає у застосуванні інфрачервоної камери і програмне забезпечення для аналізу зображень MATLAB яке використовується для аналізу ІЧ-зображення. Результати показують, що окрім миттєвого отримання ІЧ-зображень, також можна чітко визначити справну та дефектну зону панелі, а несправні сонячні панелі можна швидко порівняти за допомогою сукупних даних діаграми. Крім того з допомогою ІЧ-зображення можна ефективно шукати панелі температура яких перевищує температурний поріг, а також аномальні панелі.

Кумулятивна діаграма є зручним способом представлення розподілу температури на модулі. Відтінки сірого теплового зображення можуть показувати аномальну область на модулі. За якісним уявленням важко визначити, наскільки серйозне пошкодження. Кумулятивна крива, запропонована в цій роботі, є кількісним способом представлення розподілу температури на модулі. Однією з характеристик кумулятивної кривої, яка не була показана, є те, що ми можемо позначити будь-яку точку на кривій накопичення, щоб показати відсоток площі нижче заданої температури. Обслуговуючий персонал може швидко й точно приймати рішення на основі сукупної кривої кожного зображення.

Виявлення несправностей у сонячних модулях за допомогою штучного інтелекту є тенденцією майбутнього. Однак оригінальне зображення містить забагато інформації, тому потрібен час, щоб перевірити зображення за допомогою машинного зору чи іншої технології ШІ.

Кумулятивна функція розподілу, запропонована в нашій роботі, є новим інструментом для попереднього дослідження теплових зображень. Це набагато легший спосіб виявити аномалію сонячного модуля, ніж прямий огляд за допомогою машинного зору. Після того, як сукупна функція розподілу визначає, що з модулем щось не так, можна застосувати машинний зір для перевірки теплового зображення, щоб з'ясувати розташування, а також серйозність несправностей.

2.2 Конфігурація системи

Новизна нашого методу дослідження полягає в поєднанні БПЛА (рисунок 2.1) і камери з подвійним об'єктивом (FLIR Duo R), яка оснащена ІЧ-об'єктивом, та програмним забезпеченням для аналізу в реальному часі несправностей сонячних панелей. На рисунку 2.1 показано БПЛА з ІЧ-камерою.



а)



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд БПЛА з камерами теплового та видимого світла: (а) БПЛА, (б) Теплова камера FLIR

Таблиця 2.1

Характеристика БПЛА

Параметр	Значення
Тип	Шестиосний дрон LION-690
Пропелер	13 дюймів × 6
Вага	6 кг
Навантаження	2 кг
Крейсерська швидкість	5 -10 м/с
Роздільна здатність датчика	160 × 120

Ця система аналізу в реальному часі потребує наземної станції для контролю та аналізу. Наземна станція включає в себе приймач керування і комп'ютер, оснащений програмою MATLAB.

Принципова схема дослідження наведена на рисунку 2.2.

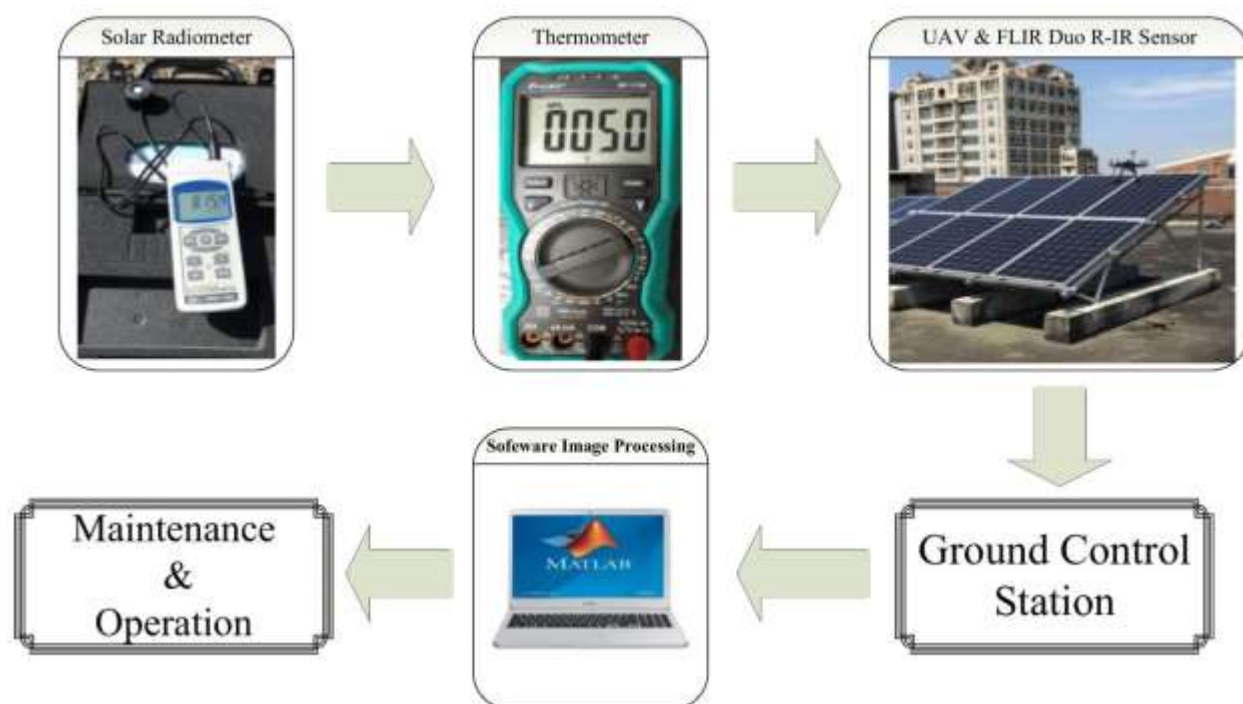


Рисунок 2.2 – Принципова схема дослідження

В процесі дослідження, коли дрон пролітає над сонячними енергетичними модулями та робить фотографії, зображення миттєво передаються на наземну станцію через вбудований радіочастотний (РЧ) канал для аналізу. Наземна станція може записувати зображення панелей і перевіряти їх стан у реальному часі.

Записані зображення аналізуються на комп'ютері в MATLAB, вихідні результати можуть надати обслуговуючому персоналу підтвердження для визначення того, чи потрібна заміна панелі для покращення продуктивності та продовження терміну служби СЕС. Крім того, своєчасне усунення дефектів може запобігти передчасному старінню панелі та зменшенню витрат на технічне обслуговування.

Єдиною проблемою є правильна інтерпретація отриманого ІЧ-зображення через невизначені фактори, такі як якість зображення, погодні умови, тіні під час огляду та відбиття сонячного світла. Основний алгоритм запропонованої схеми наведено на рисунку 2.3.

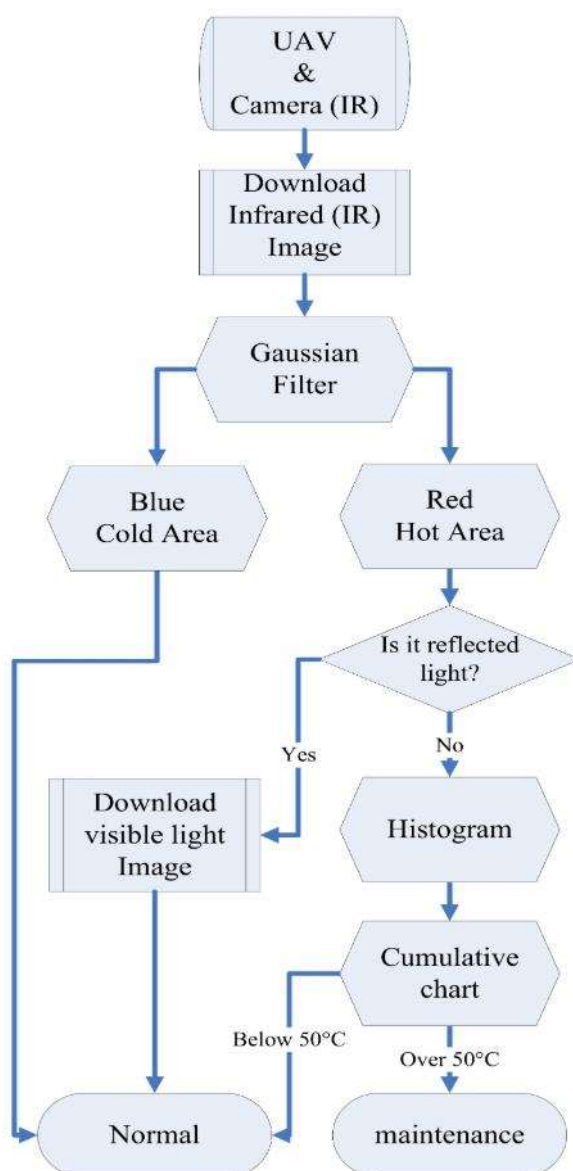


Рисунок 2.3 – Блок схема запропонованого алгоритму

2.3 Проведення польових досліджень

Польові дослідження проводились на території найбільшої СЕС в Хмельницькій області, розташування СЕС за GPS-координатами 48.62784174601313, 26.632985495311775, номінальна потужність цієї сонячної електростанції становить 63,8 МВт. Загальний вигляд СЕС показано на рисунку 2.4 і 2.5.

Експеримент проводився 1 квітня 2024 року о 11:50. Температура на вулиці 29 °С. Температура поверхні нормального робочого сонячного модуля

становила $45 \sim 49\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура поверхні ненормального сонячного модуля становить $50 \sim 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ з опроміненням 827 Вт/м^2 .



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд СЕС



Рисунок 2.5 – Розташування Кам'янець-Подільської СЕС на карті

Напочатку дослідження з допомогою БПЛА був проведений аналіз СЕС і виставлені основні точки СЕС і складена карта польотів, як показано на рисунках 2.6 і 2.7.



Рисунок 2.6 – Розташування основних точок СЕС

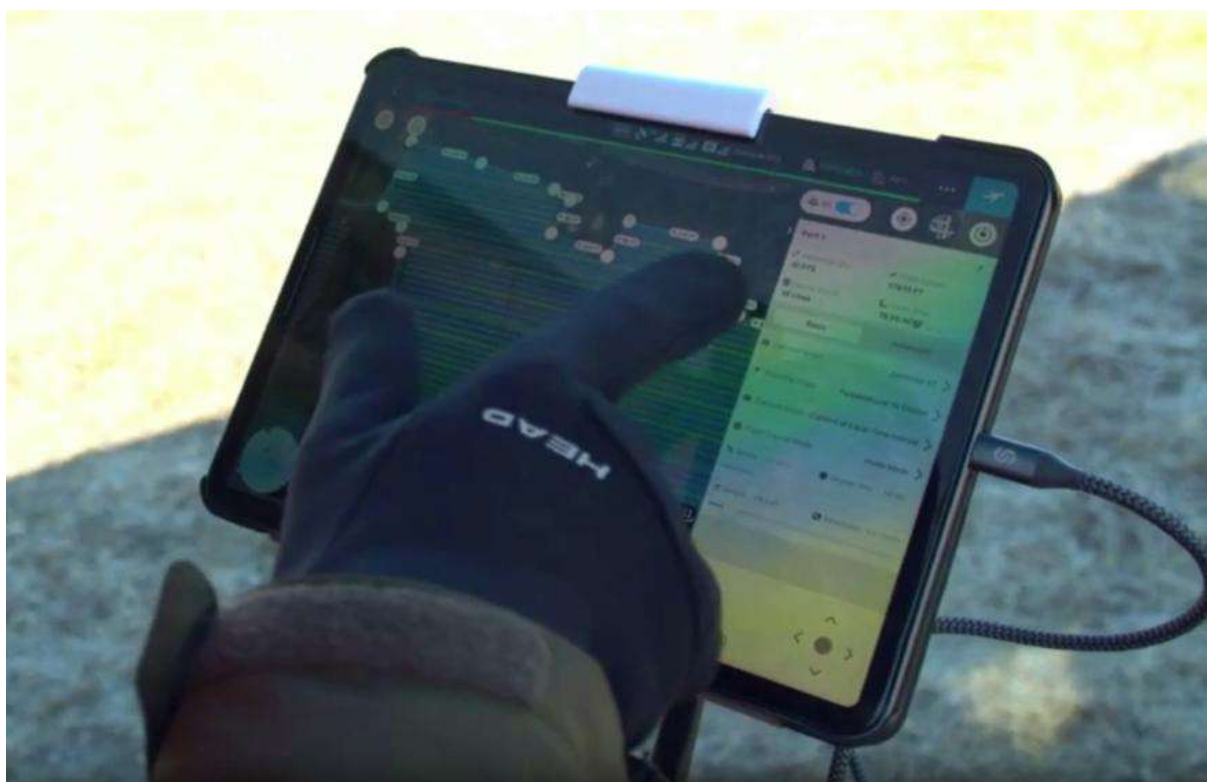


Рисунок 2.7 – Складання карти польотів

Як спосіб обробки інформації у нашому дослідженні ми розглядали три різні методології фільтрації і зупинились на фільтрі Гаусса як найбільш придатним для виявлення плям високої температури на сонячних панелях. Тобто для попередньої обробки ІЧ-зображення буде використовуватись фільтр Гауса, а розподіл температури на панелі буде представлено за допомогою гістограм та кривих.

Піксель ІЧ-зображення складається з різних співвідношень RGB. У відповідь на це першим кроком стає перетворення зображення з RGB на градації сірого. Ця процедура не тільки підвищує роздільну здатність зображення, але й полегшує оцінку кольорів зображення. Одночасно обов'язково застосовуються фільтри для усунення шумів і зниження різкості зображення. Фактично, методи фільтрації застосовуються для попередньої обробки зображення перед виявленням дефектів. У цьому дослідженні фільтри Гауса застосовуються для зменшення шуму та інших непотрібних деталей в ІЧ-зображеннях. Зазвичай такі дефекти, як гарячі плями та тріщини, можуть впливати на однорідність температури на модулі сонячної панелі та призводити до різних кольорів на ІЧ-зображенні. Однак на ІЧ-зображенні також може з'явитися шум, через який реальні дефекти можуть бути неправильно проаналізовані. На відфільтрованому зображенні можна чітко розрізнити нормальні компоненти та дефектні ділянки на модулі сонячної панелі, як показано на рисунку 2.8.

ІЧ-зображення було оброблено в градаціях сірого з подальшим поділом чорних і білих пікселів зображення, як показано на рисунку 2.8 б, що показує холодні області та гарячі області на поверхні сонячної панелі відповідно. Щоб чіткіше показати дефект, необхідно перетворити його на зображення RGB, як показано на рисунку 2.8 с. Після перетворення зелена область відображає холодну зону, а червона зона – гарячу зону. Відповідність між кольором і температурою показано на кольоровій панелі. Найнижча температура на цьому зображенні – 35 °C, а найгарячіша – 55 °C.

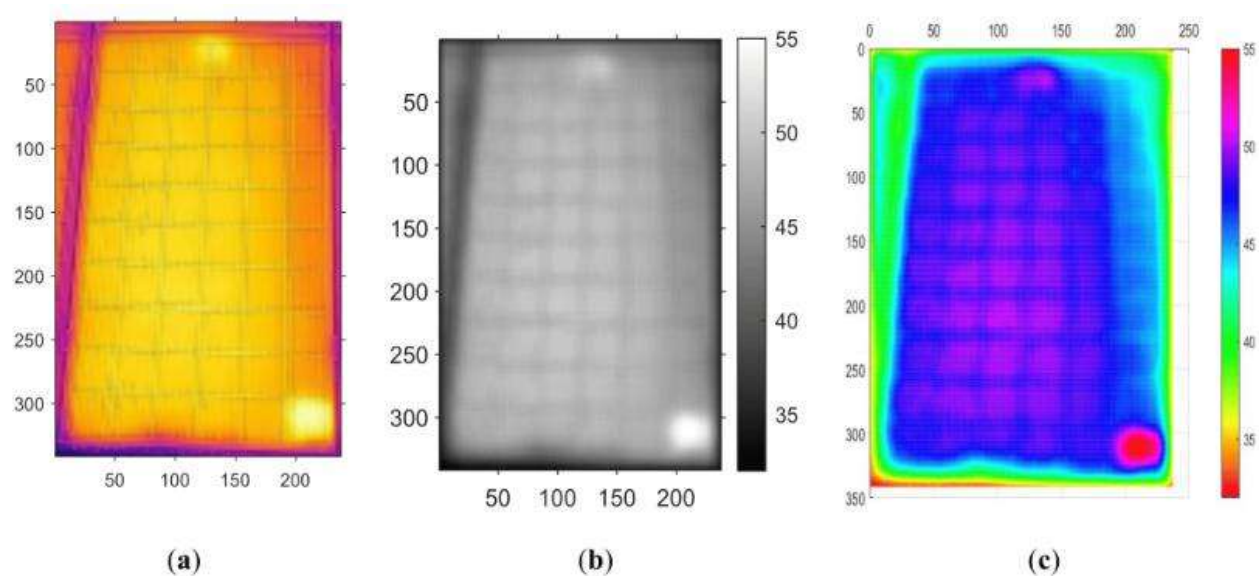


Рисунок 2.8 – Попередня обробка ІЧ-зображення

(a) - ІЧ-зображення панелі, (b) - відфільтроване за Гауссом зображення у відтінках сірого, (c) - кольорове зображення.

На рисунку 2.8 а показано ІЧ-зображення, яке було оброблено в градаціях сірого. На рисунку 2.9 показано ІЧ - зображення справного сонячного модуля. В основному панель має однорідну температуру з жовтувато-помаранчевим кольором, але також відображаються деякі області яскравого кольору, що вказує на те, що на панелі є області з вищою температурою. На рисунку 2.9 б показано зображення, перетворене на градації сірого після фільтра Гауса.

В нашій роботі ми пропонуємо алгоритм обробки ІЧ-зображень сонячних панелей у середовищі Matlab. Перед застосуванням цього алгоритму необхідно виконати дві умови:

1. По-перше, перед проведенням дослідження переконатися що опромінення $I \geq 700 \text{ Вт/м}^2$.

2. По-друге, перед дослідженням необхідно виміряти інтенсивність сонячного випромінювання та встановити термометр на сонячній панелі. Це пояснюється тим, що температура оточуючого середовища впливатиме на температуру панелі.

Таким чином, моніторинг БПЛА необхідно проводити за умов, зазначених вище. Його мета полягає в тому, щоб переконатися, що зчитування температури

є правильним під час виконання аналізу зображення в Matlab.

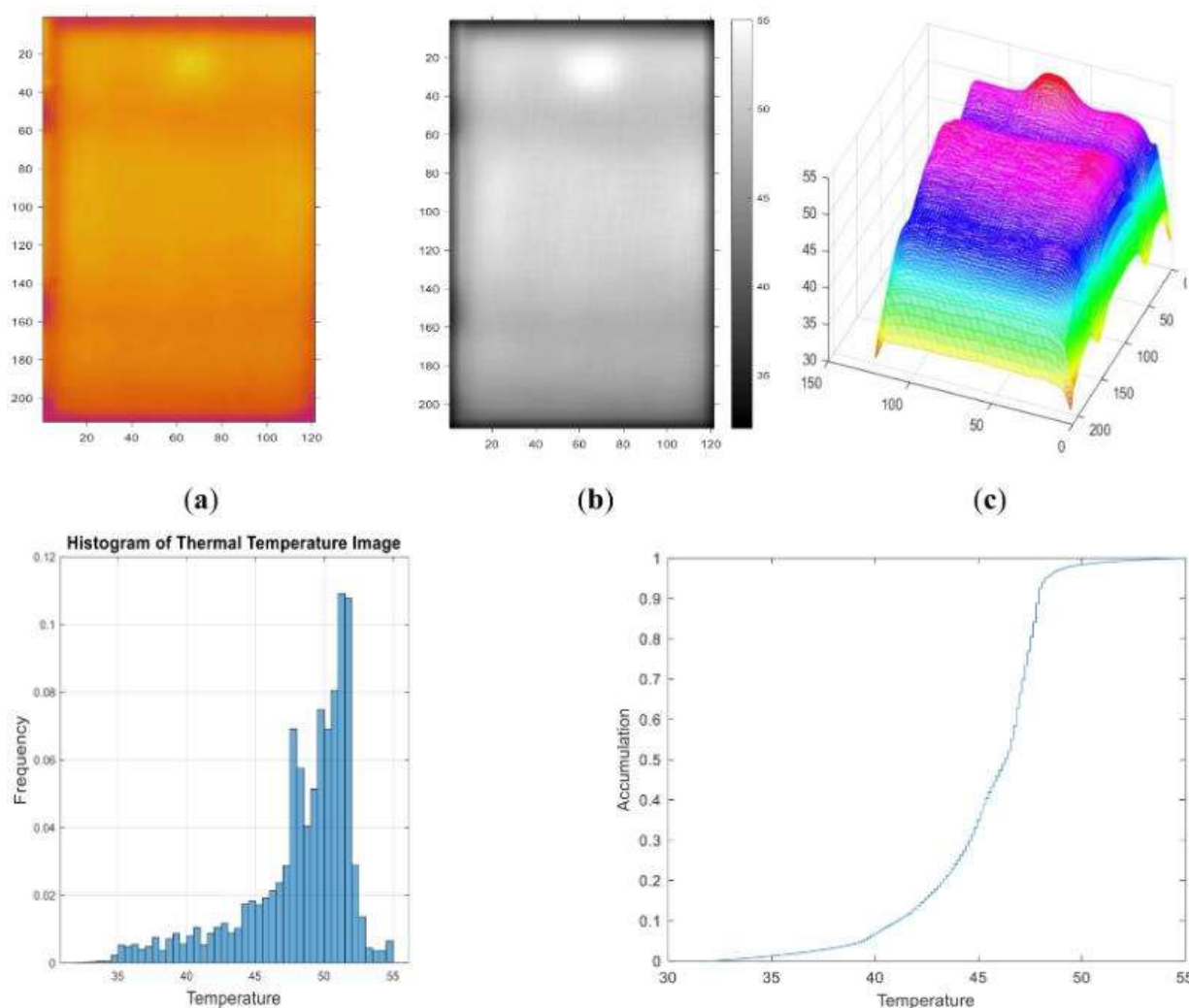


Рисунок 2.9 – Аналіз зображення справної сонячної панелі

(a) - ІЧ-зображення панелі, (b) - відфільтроване за Гауссом зображення у відтінках сірого, (c) - тривимірне зображення, (d) - гістограма розподілу температури, (e) - діаграма розподілу температури.

Вимірювання проводилось з допомогою термометра, показаного на рисунку 2.2. Отже температура всієї панелі була приблизно 48 °С, тоді як нормальна робоча температура здорового сонячного модуля становить від 45 °С до 49 °С. Однак у верхній середній частині цієї панелі є гаряча точка розміром із комірку, і точне вимірювання площі цієї гарячої точки становить 1,67% від загальної площі з температурою 55 °С. Причина полягає в тому, що на задній частині панелі є розподільна коробка, розташована якраз навпроти зони гарячої

точки, і температура в цій області порівняно вища, ніж навколо неї, через теплопровідність розподільної коробки, яка відображається як дефект.

Як правило сонячні панелі є основними елементами сонячної електростанції. Кілька панелей з'єднаних послідовно та паралельно та інкапсульовані разом, щоб утворити модуль фотоелектричної сонячної електростанції.

В нашій роботі експериментальний сонячний модуль складається з 6×10 панелей, тобто один сонячний модуль містить 60 елементів. Відмова окремої комірки спричинить дефект $1/60$ площі модуля (приблизно 1,67%).

Інноваційний метод діагностики в цьому дослідженні може виявити не тільки гарячі області, але й визначити тип дефекту спричиненого несправністю комірки або забрудненням.

Загалом на етапі досліджень було протестовано шістсот панелей. Експерименти проводилися в різних місцях верифікаційного поля. У кожному випадку для перевірки було відібрано від одного до трьох зображень.

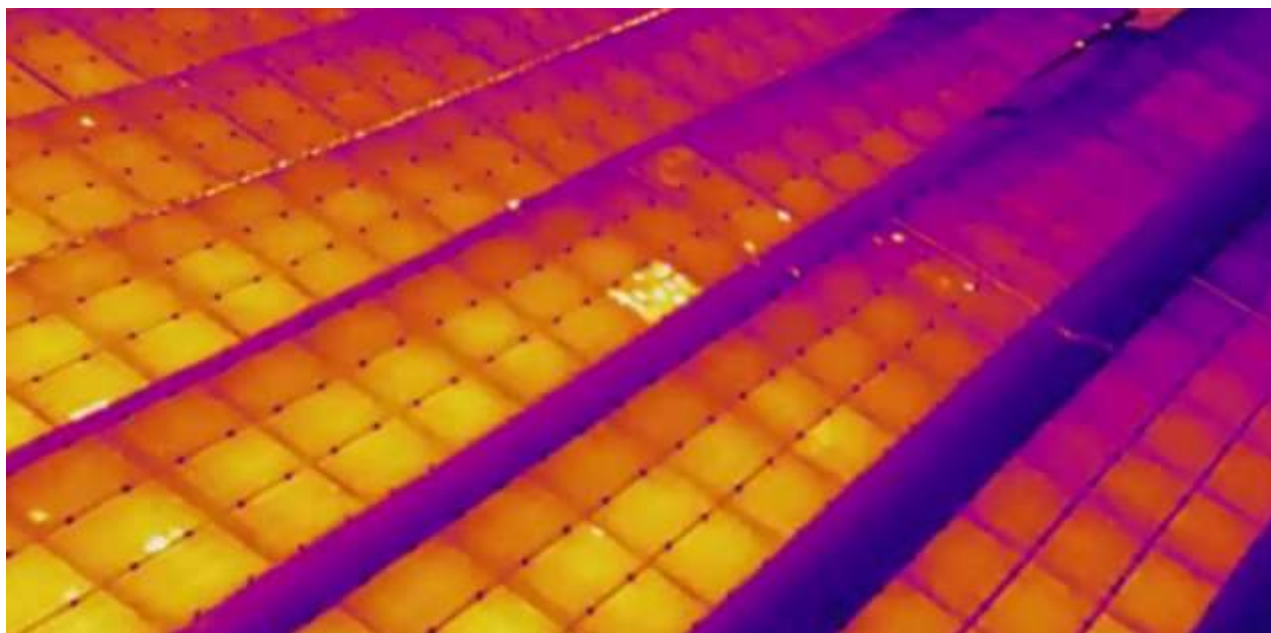


Рисунок 2.10 – Дефектні плями на сонячних панелях

На рисунку 2.11 показано ІЧ-зображення з чіткою та яскравою областю в нижньому лівому куті, яка відповідає дефектній комірці, тоді як менш яскрава область, розташована у верхній частині є розподільною коробкою. В цьому випадку ефективність виробництва електричної низька, але при візуальному

огляді явних пошкоджень не виявлено.

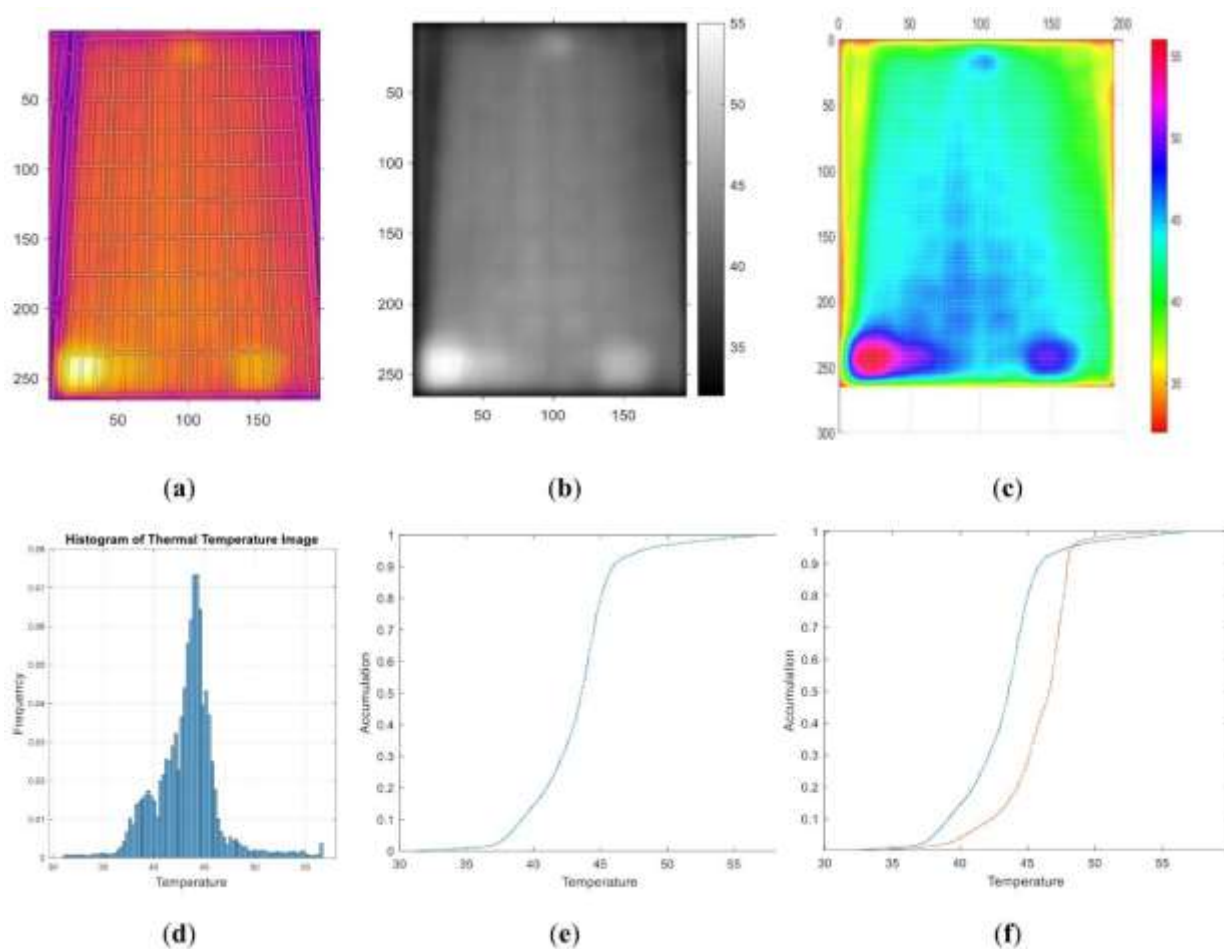


Рисунок 2.11 – Загальний вигляд дослідної фотоелектричної панелі

(a) - ІЧ-зображення панелі, (b) - відфільтроване за Гауссом зображення у відтінках сірого, (c) - кольорове зображення з фільтром Гауса, (d) - гістограма розподілу температури, (e) - діаграма розподілу температури, (f) - діаграма порівняння нормальної роботи та дефектних умов сонячної панелі.

Ще на одній дослідній панелі дефектних ділянок не виявлено, але в центральній частині панелі можна спостерігати кілька крапель пташиного посліду. На рисунку 2.12 а показано зображення панелі, отримане за допомогою камери візуалізації. Виявлено, що пташиний послід не можна було легко відрізнити від фону шляхом візуального огляду, оскільки і пташиний послід і панель чорного кольору.

На рисунку 2.12 б показано ІЧ-зображення з яскравою кольоровою областю в центральній частині панелі, яка є місцем розташування пташиного

посліду. Однак він не яскравіший за температуру оточуючого середовища і його можна легко помітити не лише візуально а і на ІЧ-зображенні.

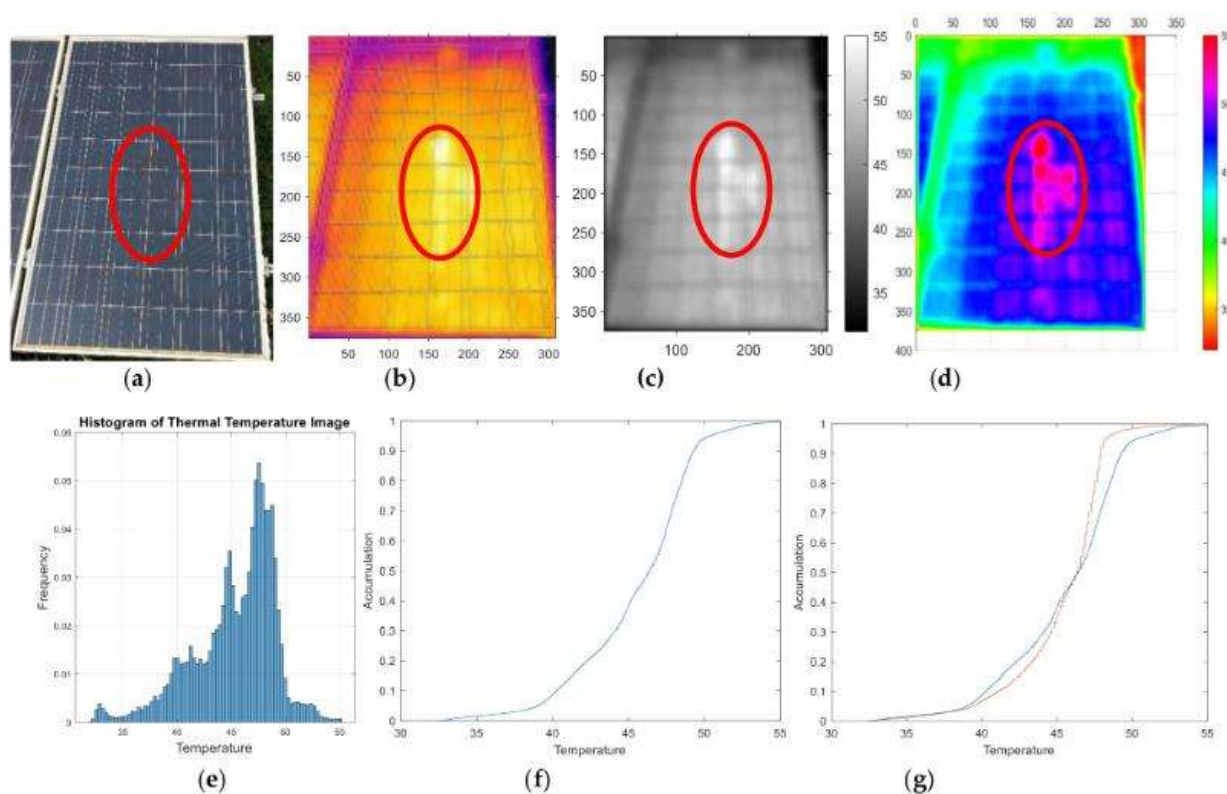


Рисунок 2.12 – Дефектні плями на сонячній панелі (пташиний послід)

(a) - зображення сонячної панелі, (b) - ІЧ-зображення панелі, (c) - відфільтроване за Гауссом зображення у градаціях сірого, (d) - кольорове зображення з фільтром Гаусса, (e) – гістограма розподілу температури, (f) - діаграма розподілу температури, (g) - діаграма-порівняння нормальної роботи та дефектних умов сонячної панелі.

Також проводився аналіз зображення панелі встановленої не горизонтально, а не вертикально. На цій панелі є багато яскравих ділянок що свідчить про велику кількість гарячих ділянок.

На рисунку 2.13 b показано зображення, перетворене на градації сірого після фільтрації Гауса. Лінії сітки на панелі розмиті через ефект фільтрації, але яскраві області видно краще, ніж на інфрачервоному зображенні. На рисунку 2.13 c показано кольорове зображення після фільтрації, щоб продемонструвати

різницю температур на панелі, гаряча область становить приблизно 55 °С. Рама панельні має температуру 43 °С, а решта панелі – приблизно 45~49 °С.

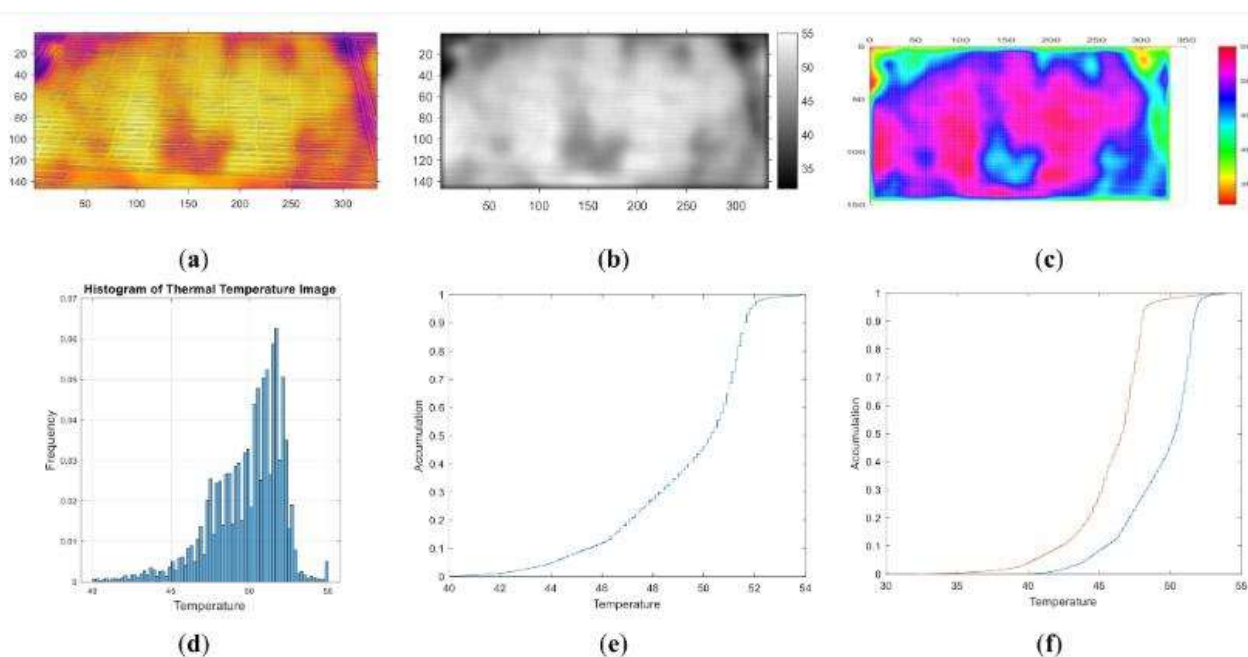


Рисунок 2.13 – Дефектні плями на сонячній панелі встановленій вертикально

На рисунку 2.13 d показана гістограма розподілу температури. Середня температура панелі 50 °С. Максимальна температура 55 °С, мінімальна 40 °С. Середня температура цієї панелі є відносно високою, і панель має багато дефектних комірок, що видно по гарячим зонам.

На рисунку 2.13 e показано розподіл температури, з якого видно, що площа гарячих зон понад 50 °С становить 53,8%, що вказує на те, що більше половини комірок на цій панелі є дефектними, що вище порогового значення нормативного значення для сонячних панелей на 1,5% і що вказує на те, що 31 елемент має аномалію або несправність і лише 46,2% панелі є нормальною, як показано на рисунку 2.13 d,e.

На рисунку 2.13 f проведено наведено значення для нормальних і дефектних умов роботи панелі.

Отже, коли температура однієї комірки на сонячній панелі перевищує 50 °С, це означає, що в одній комірці панелі виникає гаряча зона або аномалія, що

може зменшити генерацію електроенергії модулем.

Інноваційний метод нашого дослідження дозволяє не тільки знайти гарячі області, але й оцінити їх кількість та тип. Це дозволить уникнути неправильного тлумачення гарячих зон, спричинених деякими невеликими плямами (такими як пташиний послід, гілки, листя або пил).

Якщо частка гарячих зон не кратна 1,67% і форма гарячих точок є неправильною, можна визначити, що сонячна панель забруднена і потребує простого очищення.

За формою та кількістю гарячих зон на сонячній панелі, можна зробити висновок про її працездатність і потребу в чищенні, обслуговуванні або заміні. В результаті збільшується термін служби сонячних модулів і знижуються витрати.

2.4 Висновки до розділу 2

У цьому розділі роботи пропонується чотириетапна процедура аналізу зображення. ІЧ-зображення фільтрується та перетворюється на зображення у відтінках сірого на першому етапі. На другому етапі зображення перетворюється у 3-D модель, щоб показати різницю температур. На третьому етапі будується гістограма розподілу температури, щоб визначити відсоток високотемпературної області. Діаграма розподілу температур будується на останньому етапі, щоб визначити кількість комірок, які можуть бути дефектними.

Згідно з результатами аналізу можна не тільки значно скоротити час перевірки, але також можна проаналізувати місце дефекту в режимі реального часу. Це особливо зручно для обслуговуючого персоналу сонячних фотоелектричних станцій, тому що по діаграмам можна визначити не тільки площу дефектної зони, але і кількість дефектних комірок. Також дана процедура може запобігти помилковим перевіркам, і таким чином дозволить отримати найкращий результат.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розробка моделі роботи БПЛА

Розроблено модель роботи БПЛА для визначення оптимального маршруту, яким має переміщуватись літальний апарат для повної перевірки фотоелектричної системи з мінімальним використанням енергії та економією часу. Динамічна модель польоту описується різними математичними рівняннями, які застосовуються для розрахунку фізичних сил, що діють на віртуальний літальний апарат. У цій роботі запропоновано спрощену динамічну модель польоту, яка уникає використання рівнянь із частинними похідними або складної гідродинаміки. Спрощена динамічна модель дозволяє розрахувати потужність двигуна на виконання складних алгоритмів, перевірка яких є основною метою цього розділу. Основним недоліком такого спрощення є зниження точності. Однак ця модель не призначена для точного розрахунку енергоспоживання, а для визначення впливу деяких змінних продуктивності на час інспекції та енергоспоживання. Мета полягає в тому, щоб продемонструвати, що оптимізація параметрів інспекції (оптимальні кути, висота та ін.) разом із оптимізацією маршруту БПЛА дозволяє зменшити витрати енергії та часу, необхідні для проведення повітряних інспекцій.

3.1.1 Сила тяги та потужність, що забезпечуються двигунами

Сила тяги двигуна F_d визначається за формулою:

$$F_d = \frac{(P_d \cdot J \cdot r)^{2/3}}{K} \quad (3.1)$$

де: P_d - потужність двигуна.

K - константа, яка залежить від густини повітря (ρ).

r - радіус пропелерів.

J - загальна кількість двигунів.

Густина повітря (ρ) залежить від кількох змінних, таких як висота, тиск, температура, вологість тощо. Максимальна висота, яку може досягти БПЛА, зазвичай обмежується законодавчими вимогами, а також максимально допустимою відстанню між БПЛА та панелями фотоелектричних модулів під час перевірок. Отже, ρ не змінюється при дослідженні різних об'єктів. Однак для кожного іншого спостереження ρ (формула 3.2) і K (формула 3.3) обчислюються відповідно до закону ідеальних газів:

$$\rho = \left(\frac{P_o}{R \cdot T} \right) \cdot \exp \left(\frac{-g \cdot (h + z)}{R \cdot T} \right) \quad (3.2)$$

$$K = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho}} \quad (3.3)$$

де: P_o атмосферний тиск (Pa).

R – універсальна газова стала ($286.9 \text{ Дж/Кг} \cdot \text{К}$).

g - прискорення сили тяжіння (9.8 м/с^2).

z - висота сонячної електростанції ($м$).

h - висота БЛА ($м$).

3.1.2 Аеродинамічний опір

Аеродинамічний опір – це сила, що протидіє руху об'єкта в просторі, тобто опір руху БПЛА в повітрі. Опір, який відчуває БПЛА під час польоту, складається з двох основних компонентів: індуктивного та паразитного опору. Індуктивний опір є наслідком підйомної сили, тобто реактивної сили, що виникає через різницю тисків над і під пропелерами, яка дозволяє БПЛА долати силу тяжіння. Індуктивний опір відповідає горизонтальній компоненті цієї підйомної сили.

Паразитний опір є силою, що виникає через тертя між повітрям і різними частинами БПЛА. Точний розрахунок аеродинамічного опору є складним завданням, і сучасні моделі не можуть досягти 100% точності. У нашій роботі

також враховується вплив швидкості та напрямку вітру на БПЛА. Таким чином, розрахунки виконуються з урахуванням відносної швидкості між БПЛА та вітром. Аеродинамічний опір (F_D), що враховує індуктивний і паразитний опір, може бути розрахований за формулою (3.4).

$$F_D = 0,5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (3.4)$$

де: C_D – аеродинамічний коефіцієнт БПЛА.

v – відносна швидкість між БПЛА та вітром.

A – площа поверхонь, перпендикулярних осям X , Y , Z .

Розглянуто аеродинаміку A (A_x , A_y , A_z) гексакоптера.

На рисунку 3.1 зображено схему, яка використовується для розрахунку площі поверхонь. Da – діаметр плеча, Dt – максимальна відстань між двигунами, Db – відстань зони корисного навантаження і Hb – максимальна висота БПЛА в польоті.

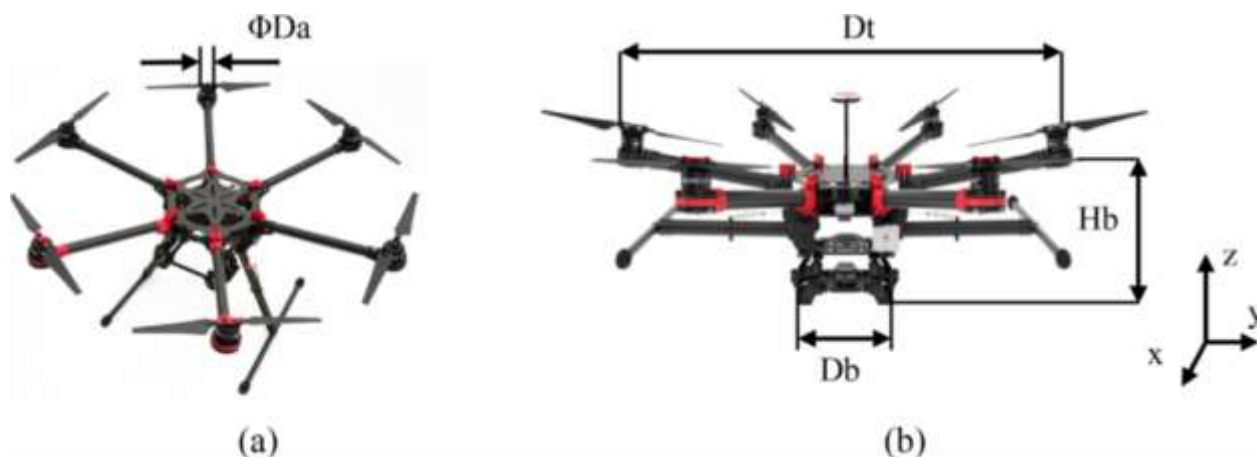


Рисунок 3.1 – Зони БЛА, які використовуються для розрахунку аеродинамічного опору. A_z (a); A_x і A_y (b)

Площі поверхонь (A) обчислюються за формулами 3.5 - 3.7.

$$A_x = Db \cdot Hb + Da \cdot Dt \quad (3.5)$$

$$A_y = Db \cdot Hb + Da \cdot Dt \quad (3.6)$$

$$A_z = Db \cdot Hb + Da \cdot Dt \quad (3.7)$$

Аеродинамічний коефіцієнт для гексакоптера зі швидкістю 90 км/год при ламінарному потоку повітря становить $C_{Dx} = 0,9$; $C_{Dy} = 0,9$; $C_{Dz} = 1,2$.

Розрахуємо відносну швидкість між БПЛА та вітром за формулою (3.8).

$$v = V + W \quad (3.8)$$

де: v – вектор відносної швидкості між БПЛА та вітром.

V – абсолютна швидкість БПЛА.

W – абсолютна швидкість, зафіксована анемометром.

Отже, аеродинамічний опір F_D , будемо розраховувати за формулою 3.9.

$$F_D = \begin{bmatrix} 0.5 \cdot C_{Dx} \cdot \rho \cdot v_x^2 \cdot A_x \\ 0.5 \cdot C_{Dy} \cdot \rho \cdot v_y^2 \cdot A_y \\ 0.5 \cdot C_{Dz} \cdot \rho \cdot v_z^2 \cdot A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \cdot C_{Dx} \cdot \rho \cdot (V_x - W_x)^2 \cdot A_x \\ 0.5 \cdot C_{Dy} \cdot \rho \cdot (V_y - W_y)^2 \cdot A_y \\ 0.5 \cdot C_{Dz} \cdot \rho \cdot (V_z - W_z)^2 \cdot A_z \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.1.3 Баланс сил

Усі сили, описані вище, пов'язані між собою динамічним рівнянням. Швидкість БПЛА (V) вважатимемо постійною величиною між сусідніми об'єктами дослідження (ОД), відповідно, прискорення між цими точками дорівнюватиме нулю. На рисунку 3.2 зображена схема сил, що беруть участь у динаміці БПЛА.

$$\vec{F}_{th} + \vec{F}_D + \vec{F}_g = 0 \quad (3.10)$$

$$F_{th} \cdot \sin(\beta_t) \cdot \cos(\alpha_t) - 0,5 \cdot C_{Dx} \cdot \rho \cdot (v_x)^2 \cdot A_x = 0 \quad (3.11)$$

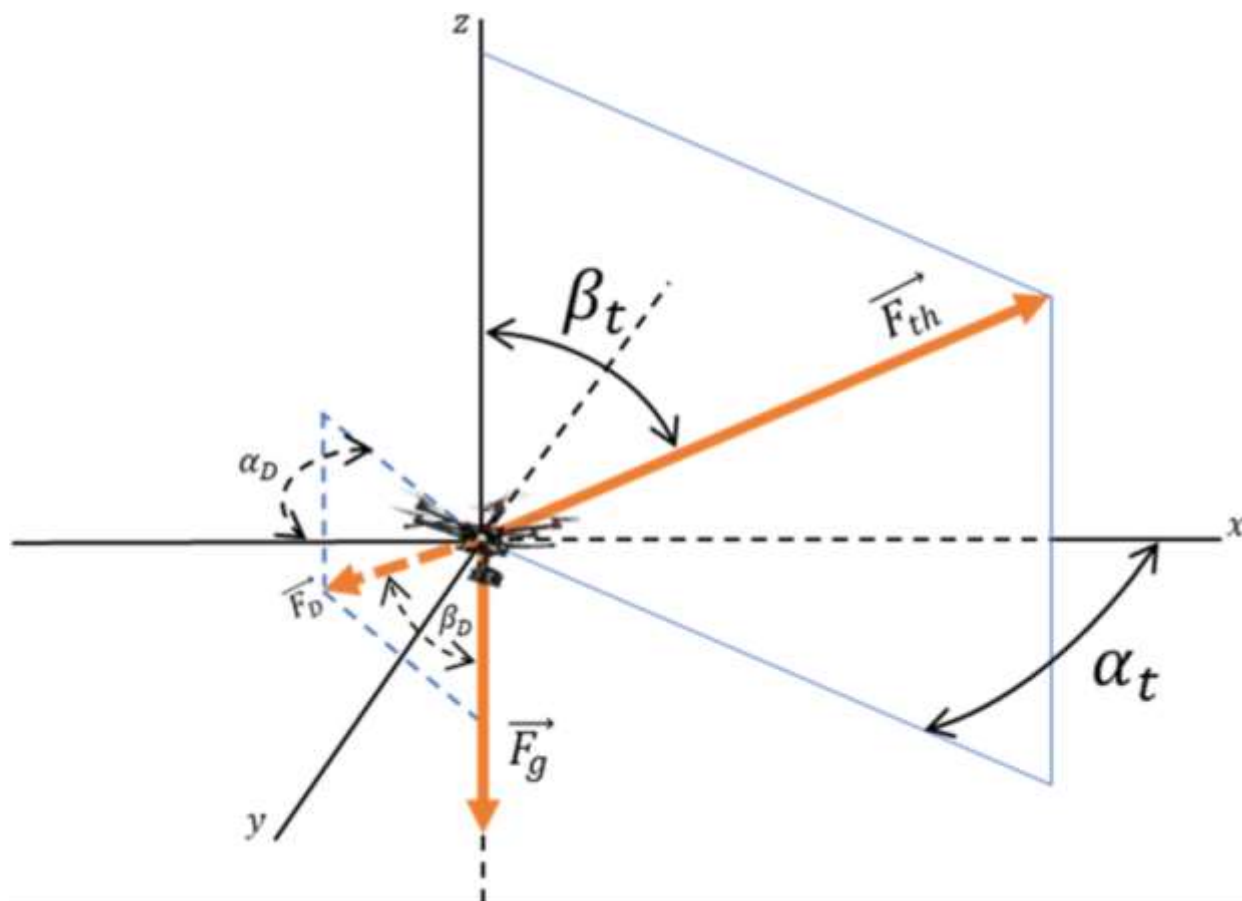


Рисунок 3.2 – Зони, що враховуються для аеродинамічного опору. A_z (зліва); A_x і A_y

$$F_{th} \cdot \sin(\beta_t) \cdot \sin(\alpha_t) - 0,5 \cdot C_{Dy} \cdot \rho \cdot (v_y)^2 \cdot A_y = 0 \quad (3.12)$$

Баланс сил визначаємо за формулами (3.10 – 3.13).

$$F_{th} \cdot \cos(\beta_t) - 0,5 \cdot C_{Dz} \cdot \rho \cdot (v_z)^2 \cdot A_z - m \cdot g = 0 \quad (3.13)$$

У нашій роботі припускаємо, що напрямок вітру паралельний землі, тому аеродинамічний опір буде враховуватися лише для горизонтальних рухів. У випадку вертикальних підйомів або спусків єдиною силою, яка протидіє руху, буде вага БПЛА.

Кут α_t визначається за формулою (3.14), кут β_t – за формулою (3.15), а модуль тягової сили – формулою (3.16).

$$\alpha_t = \arctan \left(\frac{C_{Dy} \cdot (v_y)^2}{C_{Dx} \cdot (v_x)^2} \right) \quad (3.14)$$

$$\beta_t = \arctan \left(\frac{0,5 \cdot C_{Dy} \cdot p \cdot (v_y)^2 \cdot A_y}{\sin(\alpha_t) \cdot 0,5 \cdot C_{Dz} \cdot p \cdot (v_z)^2 \cdot A_z + \sin(\alpha_t) \cdot m \cdot g} \right) \quad (3.15)$$

$$F_{th} = \frac{0,5 \cdot C_{Dy} \cdot p \cdot (v_y)^2 \cdot A_y}{\sin(\beta_t) \cdot \sin(\alpha_t)} \quad (3.16)$$

Відповідно до формул (3.14-3.16), загальна потужність, що забезпечується всіма двигунами, P , визначається формулою (3.17):

$$P = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho}} \cdot \frac{F_{th}^{3/2}}{r} \quad (3.17)$$

3.1.4 Витрати енергії

Витрати енергії можна оцінити шляхом розрахунку потужності, необхідної для підтримання постійної швидкості V під час переміщення від одного об'єкту дослідження і до іншого об'єкту дослідження. Нехай Δ_{ij} це відстань між двома об'єктами дослідження. Енергія, спожита під час переміщення від одного об'єкта дослідження до іншого, визначається за формулою (3.18):

$$e_{ij} = P_{ji} \cdot \frac{\Delta_{ij}}{V_{ij}} \quad \forall i=1,2,3...p. \quad (3.18)$$

Витрати енергії є одним із основних обмежень у моделі, оскільки воно повинно бути нижчим за поріг, оскільки воно повинно бути нижче порогового значення, яке визначається ємністю акумулятора згідно формули (3.19). Це використовується для визначення оптимального маршруту для огляду

максимальної кількості фотоелектричних панелей із заданою точністю огляду (висотою), напругою та автономністю акумулятора:

$$E(t) > Bat_{\min} \quad (3.19)$$

3.2 Застосування генетичного алгоритму для оптимізації маршруту

Генетичний алгоритм (ГА) є ефективним у задачах оптимізації маршрутів і використовується для визначення порядку розташування кожного БПЛА.

Загальні витрати маршруту розглядаються як загальна енергія, необхідна для здійснення польоту. Нехай e_{ij} це енергія, необхідна для переміщення від одного об'єкту дослідження до іншого. Для кожного об'єкту дослідження розглядається бінарна змінна x_{ij} , яка розраховується за формулою (3.20):

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{якщо шлях } (i, j) \text{ належить маршруту,} \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (3.20)$$

Такий підхід мінімізує загальну енергію, яка витрачається під час маршруту (E_{total}), розраховується за формулою (3.21):

$$\min E_{\text{total}} = \sum_{j=0}^n \sum_{j \neq i}^n e_{ij} x_{ij} \quad (3.21)$$

Це дослідження є складною задачею комбінаторної оптимізації. Генетичний алгоритм є ефективний для такого типу задач.

На рисунках 3.3 - 3.6 показано результати для довільної швидкості вітру $\vec{W} = [10, 10, 0]$. На рисунку 3.3 наведено об'єкти дослідження (ОД), отримані за допомогою алгоритму. Рисунок 3.4 показує матрицю енергетичних витрат, де кольорова шкала відображає необхідну енергію для переміщення БПЛА між двома ОД: тепліші кольори відповідають більшому споживанню енергії. Наприклад, головна діагональ цієї матриці має найменші витрати, оскільки вони

відповідають переміщенню БПЛА в межах одного й того ж ОД. Рисунок 3.5 демонструє оптимальний маршрут об'єктів дослідження, наведеними на рисунку 3.3. Початкова і кінцева точки польоту визначені алгоритмом у ОД₁₂ і позначені чорним кружечком на рисунку 3.5. На рисунку 3.6 зображено оптимальний рівень енергії, яка витрачається залежно від покоління (набору допустимих рішень), де мінімальне споживання енергії становить 19,88 Вт·год.

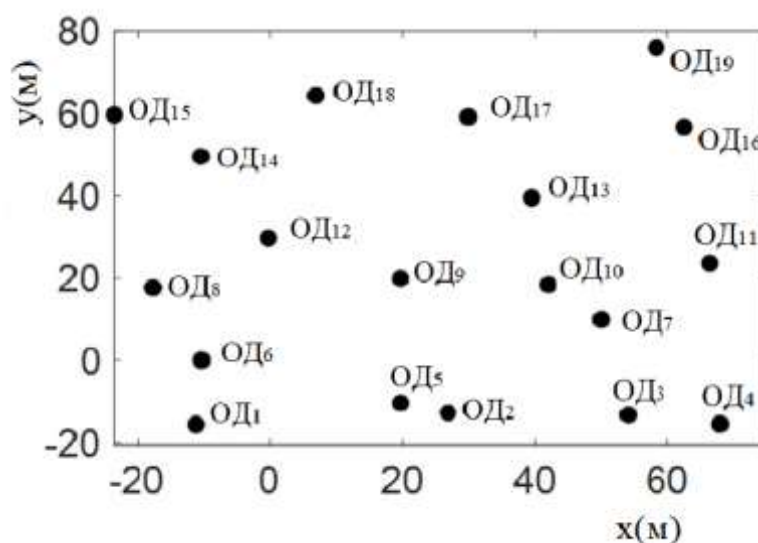


Рисунок 3.3 – Розташування об'єктів дослідження (ОД), які визначені за допомогою алгоритму

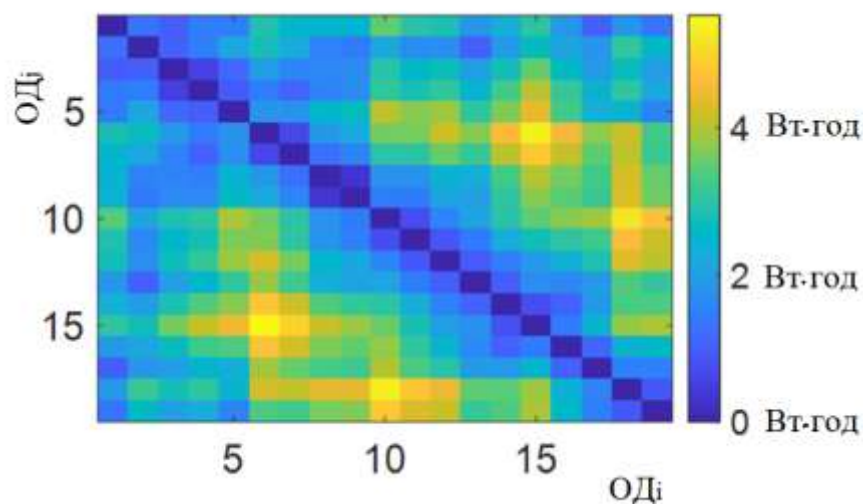


Рисунок 3.4 – Матриця енергетичних витрат

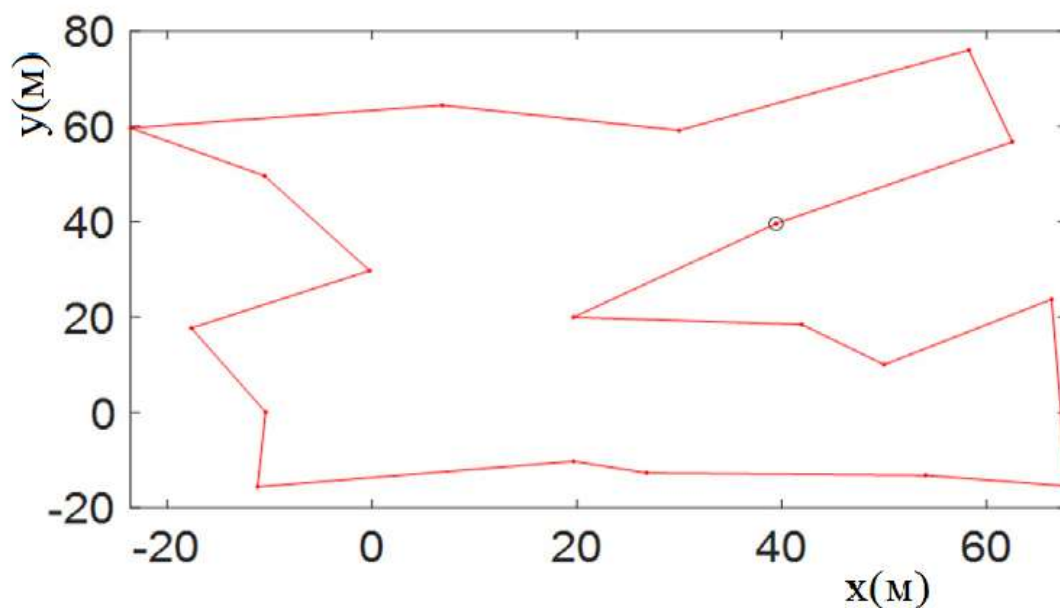


Рисунок 3.5 – Оптимальний маршрут об'єктів дослідження

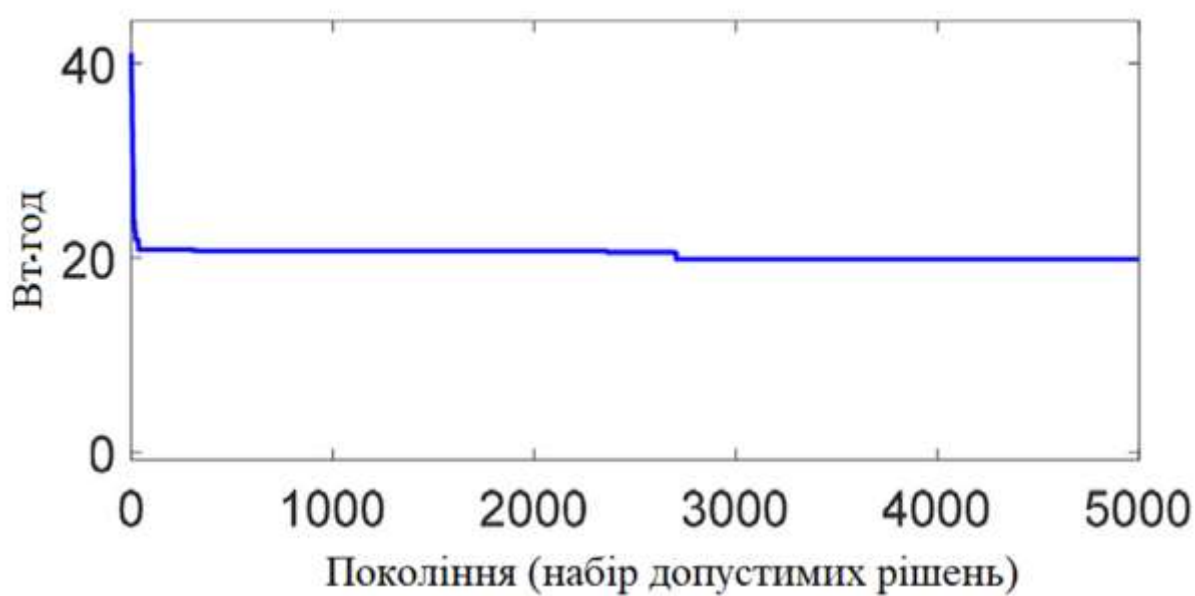


Рисунок 3.6 – Загальні витрати енергії згідно генетичного алгоритму

3.3 Висновки до розділу 3

У третьому розділі було розглянуто і розроблено модель роботи безпілотного літального апарата (БПЛА) для виконання інспекції фотоелектричних

систем. У моделі враховувались ключові аспекти, такі як динамічні сили, аеродинамічний опір, витрати енергії, а також баланс сил під час польоту. Основні досягнення цього розділу можна підсумувати наступним чином:

1. Розробка динамічної моделі:

1.1 Модель дозволяє оцінити вплив параметрів, таких як висота, швидкість та траєкторія польоту, на витрати енергії та час виконання інспекції.

1.2 Використання спрощеної динамічної моделі забезпечило зменшення обчислювальної складності, хоча точність розрахунків була частково знижена.

2. Вивчення аеродинамічного опору:

2.1 Визначено основні компоненти опору (індуктивний та паразитний) і їх вплив на характеристики польоту.

2.2 Проведено розрахунки, які враховують відносну швидкість між БПЛА та вітром.

3. Оптимізація маршруту:

3.1 Використання генетичного алгоритму для визначення оптимального маршруту інспекції дозволило мінімізувати енергетичні витрати.

3.2 Оптимізація маршруту довела свою ефективність у задачах комбінаційної оптимізації, забезпечивши мінімальне споживання енергії у 19,88 Вт·год.

Таким чином, розділ демонструє, що комплексний підхід до моделювання та оптимізації роботи БПЛА сприяє значному підвищенню ефективності польотів та зниженню енергетичних витрат. Це робить модель перспективною для подальших досліджень і практичного впровадження в системах моніторингу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Інструкція з безпечної експлуатації та технічного обслуговування безпілотників (БПЛА)

I. Підготовка до зльоту

A. Повністю зарядіть акумулятори

Переконайтеся, що ваші акумулятори були повністю заряджені перед зльотом, і переконайтеся, що напруга акумулятора є нормальною.

B. Попередньо прогрійте батареї

Заздалегідь використовуйте попередній нагрівач батареї або увімкніть батарею, щоб розігріти батарею до температури понад 15°C, зменшуючи тим самим внутрішній опір батареї.

B. Очистіть будь-який лід та сніг на своєму безпілотнику

Очистіть сніг та лід на поверхні дрона. Якщо на поверхнях датчиків виявиться рідина, негайно витріть їх насухо, щоб запобігти замерзанню через низькі температури в повітрі.

Г. Прогрійте дрон

Увімкнувши ваш дрон, прогрійте його приблизно 1 хвилину перед зльотом, щоб забезпечити нормальну роботу різних датчиків. Якщо лінза з корисним навантаженням запотіває, увімкніть літак, щоб його попередньо нагріти та розсіяти будь-яку водяну пару на лінзі.

II. Поради щодо польоту

A. Прогрівайте після зльоту

Відразу після зльоту почекайте приблизно хвилину щоб повністю розігріти акумулятор.

B. Уважно стежте за зміною рівня заряду акумулятора

Уникайте польотів на дроні, коли у нього низький заряд акумулятора, і зарезервуйте більше енергії акумулятора ніж у звичайних температурних умовах

для повернення додому.

В. Літайте плавно та тримайтеся обраної висоти

Щоб запобігти раптовому падінню напруги акумулятора, уникайте тривалого часу польоту на високій швидкості при максимальній тязі.

Г. Остерігайтеся змін в обстановці польоту

Уникайте польотів у середовищах, які зазнають різких температурних змін, щоб запобігти появі проблем безпеки, таких як помилки датчиків та обмерзання компонентів. Крім того, щоб зберегти коректну роботу візуальних датчиків, уникайте польоту на невеликій висоті (в межах 5 м) над товстим шаром снігу.

Д. Літайте відповідально

Зверніть увагу на інформацію про екстремальну погоду, таку як сильний холод та хуртовини. Якщо програма польоту видає повідомлення про помилку щодо безпеки польоту, негайно посадіть дрон.

III. Зберігання та обслуговування після польоту

А. Протирайте дрон щоб він залишався сухим

Різниця температур при попаданні в тепле приміщення із холодного зовнішнього середовища може призвести до утворення конденсату на поверхнях дронів, таких як батареї та лінзи. У цей час негайно витріть і висушіть дрон, щоб запобігти пошкодженню його електронних компонентів.

Б. Зберігання БПЛА

Після завершення місії поверніть свій безпілотник у захисний футляр і зберігайте його в сухому приміщенні при постійній температурі від 5 до 20 °C. Уникайте зберігання дрона під прямими сонячними променями.

В. Виконуйте регулярні перевірки та технічне обслуговування

Робочі середовища з низькою температурою прискорюють старіння та пошкодження певних компонентів. Проводячи регулярні професійні перевірки безпілотника, будь-які основні проблеми можна виявити та вирішити на ранніх термінах, забезпечуючи безпечну та ефективну роботу безпілотників взимку.

4.2 Вимоги з технічної безпеки щодо експлуатації сонячного обладнання



Для довгострокової та безперебійної експлуатації сонячного обладнання, сонячна станція повинна відповідати певним технічним вимогам з безпеки. Промислові сонячні станції є складними технічними системами, які потребують регулярного обслуговування. Технічне обслуговування сонячної станції включає перевірку та обслуговування всіх компонентів системи, зокрема сонячних панелей, інверторів, акумуляторів та контролерів заряду.

При обслуговуванні сонячної станції слід регулярно перевіряти стан сонячних панелей та їх продуктивність. Панелі потрібно очищати від бруду, пилу та інших забруднень, що можуть знизити ефективність вироблення електроенергії. Також слід перевіряти стан кабелів та з'єднань, які можуть пошкодитися через корозію або зношення.

Інвертор, акумулятор та контролер заряду також потребують регулярної перевірки та обслуговування. Слід перевіряти стан і параметри електричних компонентів та здійснювати заміну в разі необхідності. Також слід моніторити роботу системи та відслідковувати її продуктивність.

Для безпечної роботи під час обслуговування сонячної станції слід дотримуватися певних правил. Роботи з підключення та відключення електрики слід проводити тільки після відключення системи від електромережі та з використанням ізоляційних засобів. Також слід виконувати всі заходи безпеки та дотримуватися інструкцій виробника при обслуговуванні технічної системи.

Захист від перевантаження. Сонячні панелі мають певну максимальну потужність, яку не можна перевищувати, щоб уникнути можливого перегріву та пошкодження обладнання. Тому важливо дотримуватись рекомендованих максимальних значень для сонячних модулів і інших компонентів. Потужність сонячного фотополу не повинна перевищувати вихідної потужності інвертора більш ніж на 20%.

Захист від пожежі. При монтажі сонячного обладнання важливо дотримуватись правильних вимог щодо електричної безпеки, щоб уникнути можливої пожежі. Сонячні модулі мають бути заземлені, а кабелі та з'єднання повинні бути захищені від надмірного тепла та механічних пошкоджень.

Захист від блискавки. Сонячні панелі підключені до мережі електропостачання. Це означає, що обладнання повинно бути захищене від блискавки за допомогою спеціальних обмежувачів перенапруги УЗПів із захистом від блискавки, які зменшують ризик ураження електричним струмом або пошкодження обладнання.

Захист від крадіжки. Сонячні панелі і інші компоненти можуть бути цінними предметами для крадіжок. Тому важливо забезпечити належний захист обладнання від крадіжок, наприклад, встановити додаткові захисні пристрої, використовувати камери спостереження або забезпечити належне огороження.

Сонячне обладнання повинне відповідати вимогам безпеки, що встановлені національними та міжнародними стандартами. Воно повинне бути виготовлене з якісних матеріалів та мати стійкість до атмосферних впливів. Сонячне обладнання повинно відповідати вимогам безпеки, щоб забезпечити безпечну експлуатацію та уникнути потенційних небезпек.

При проектуванні та виготовленні сонячного обладнання виробники повинні дотримуватися відповідних національних та міжнародних стандартів з безпеки, таких як ІЕС 61730 або UL 1703. Ці стандарти встановлюють вимоги до конструкції та випробувань сонячного обладнання, щоб гарантувати безпечну експлуатацію.

Основні вимоги безпеки для сонячного обладнання включають захист від короткого замикання, перевантаження та перенапруги. Наявність захисту від блискавки та грози є також дуже важливою, оскільки сонячне обладнання зазвичай розміщується на відкритих майданчиках.

Крім того, сонячне обладнання повинно мати вбудовані системи моніторингу та контролю, щоб виявляти можливі несправності та уникнути аварійних ситуацій. Такі системи моніторингу можуть бути підключені до централізованої системи керування та контролю енергосистеми, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які проблеми та уникнути небезпечних ситуацій.

Остаточню, відповідність сонячного обладнання вимогам безпеки є дуже важливим чинником, який повинен враховуватися під час вибору та експлуатації сонячних систем. Дотримання вимог безпеки допоможе зробити безпечною та ефективною роботу сонячного обладнання на протязі всього терміну його служби.

4.3 Надзвичайні ситуації в електроенергетичних системах

Електроенергетика України – це потужний, складний та багатогранний технологічний комплекс, метою якого є виробництво, передача і розподіл електроенергії між окремими споживачами.

Основою електроенергетики України є об'єднана електроенергетична система (ОЕС), яка здійснює централізоване енергопостачання власних споживачів і взаємодіє з енергосистемами сусідніх країн, забезпечуючи експорт та імпорт електроенергії.

Енергетична система (енергосистема) – сукупність електростанцій, електричних та теплових мереж, з'єднаних між собою і пов'язаних загальним режимом у безперервному процесі виробництва, перетворення й розподілення електроенергії та тепла за умови загального керування цим процесом.

Електроенергетична система – сукупність електрообладнання енергетичної системи та об'єднаних загальним режимом споживачів електричної енергії які становлять єдине ціле.

Згідно із Законом України «Про електроенергетику» одним з основних напрямків державної політики в електроенергетиці є збереження цілісності та забезпечення надійного і ефективного функціонування ОЕС

України, єдиного диспетчерського (оперативно-технологічного) управління нею. Забезпечення виконання цих функцій в Україні покладено на Державне підприємство НЕК «Укренерго».

НЕК «Укренерго» здійснює свою виробничу діяльність у таких напрямках: Забезпечення надійної передачі електроенергії від електричних станцій до споживачів по електричних мережах напругою 220 кВ і вище, а також здійснюється обмін електроенергією з іншими державами.

Створення умов для ефективної роботи магістральних і міждержавних електромереж як складової частини інфраструктури ринку електроенергії України.

Централізоване оперативно-технологічне управління об'єднаною енергосистемою України із забезпеченням надійної паралельної роботи теплових, атомних і гідравлічних електростанцій України та паралельної роботи з енергосистемами країн СНД, Східної і Центральної Європи, запобігання порушенням режиму й аваріям системного значення, ліквідація аварій з найменшими втратами для країни, забезпечення цілісності енергосистеми України.

В електроенергетиці України діє єдина централізована диспетчерська система оперативно-технологічного управління виробництвом, передачею та постачанням електричної енергії. Функції диспетчерського (оперативно-

технологічного) управління об'єднаною енергетичною системою України виконує державне підприємство, яке визначається центральним органом виконавчої влади, що здійснює управління в електроенергетиці. Централізоване диспетчерське (оперативно-технологічне) управління поширюється на суб'єкти підприємницької діяльності, об'єкти.

Аварія за якої відбувається часткове або цілковите руйнування електричних станцій, мереж і яка призводить до припинення електропостачання, травмування чи загибелі людей або завдає матеріальних збитків.

Стан українських електричних мереж із року в рік погіршується, що призводить до аварійних ситуацій на рівні окремих областей. Відсутність достатнього фінансування ремонтних робіт, заходів з модернізації та реконструкції електричних мереж і підстанцій може спричинити до системної аварії в об'єднаних електроенергетичних системах.

Аварії на електроенергетичних системах можуть призвести до довготривалих перерв електропостачання споживачів, великих територій, порушення графіків руху громадського електротранспорту, ураження людей електричним струмом.

4.4 Організація робіт з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій в електроенергетичних системах

Для координації дій органів державної влади та органів місцевого самоврядування, органів управління та сил цивільного захисту, а також організованого та планового виконання комплексу заходів та робіт з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій:

- 1) використовуються пункти управління та центри управління в надзвичайних ситуаціях;
- 2) утворюються спеціальні комісії з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;

- 3) призначаються керівники робіт з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;
- 4) утворюються штаби з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;
- 5) визначається потреба у силах цивільного захисту;
- 6) залучаються сили цивільного захисту до ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

До утворення спеціальної комісії з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій або призначення керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій організацію заходів з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій здійснюють відповідні комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій.

Загальне керівництво організацією та проведенням заходів і робіт з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, відновлювальних робіт здійснює залежно від рівня та характеру походження надзвичайної ситуації

Кабінет Міністрів України, центральні органи виконавчої влади, місцеві державні адміністрації, органи місцевого самоврядування, суб'єкти господарювання, на адміністративній території або території яких сталася надзвичайна ситуація.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) демонструє значну ефективність для діагностики та обслуговування фотоелектричних станцій. Це дозволяє зменшити витрати на технічне обслуговування, підвищити швидкість виявлення дефектів і забезпечити безпечну експлуатацію.

1. Запропонований метод використання інфрачервоних зображень та аналізу даних за допомогою програмного забезпечення MATLAB дозволяє швидко виявляти гарячі зони на сонячних панелях. Цей підхід скорочує час діагностики та дозволяє оперативно виявляти дефекти.

2. Розробка оптимальних маршрутів польотів БПЛА дозволяє зменшити витрати енергії та забезпечити комплексну перевірку великих площ фотоелектричних станцій. Використання математичних моделей і алгоритмів оптимізації сприяє підвищенню ефективності обслуговування.

3. Робота пропонує інтеграцію даних, зібраних за допомогою БПЛА, з геоінформаційними системами для більш ефективного управління енергетичними ресурсами. Це сприяє розвитку автоматизації та цифровізації обслуговування станцій.

4. Польові дослідження на великих сонячних електростанціях підтвердили ефективність розроблених методів. Виявлення гарячих зон, забруднень і механічних дефектів дозволило значно підвищити енергоефективність сонячних фотоелектричних станцій і зменшити витрати на обслуговування.

5. Робота показала перспективність використання БПЛА у поєднанні з інноваційними алгоритмами обробки даних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Маланчук В.В. Підвищення енергоефективності та надійності роботи фотоелектричних станцій / І.М. Сисак, В.І. Гетманюк, В.В. Маланчук // Збірник тез доповідей. Матеріали XIII міжнародної науково - технічної конференції «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 11-12 грудня 2024р.) / М-во освіти і науки України, Тернопільський нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя – Т.: ТНТУ, 2024.
2. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
3. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10.
4. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. – Т. : ТНТУ, 2013. – Том I : Природничі науки та інформаційні технології. – С. 53.
5. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Л.М. Костик, Я.М.Осадца// Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5. – С. 168-173.
6. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С. Стручок. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.
7. Тарасенко М. Dependences of relative and absolute glazed area from configuration and common areas of window embrasure / М. Тарасенко, В. Бурмака, К. Козак // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2018. – №1 (89). – С. 122-131.
8. Тарасенко М. Шляхи економії паливно-енергетичних ресурсів у побуті

/ М. Тарасенко, К. Козак // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2017. – №1 (85). – С. 101-108.

9. Тарасенко М. Економічна ефективність багатотарифного обліку електроенергії в Україні / М. Тарасенко, К. Козак // Світлотехніка та електроенергетика. – 2017. – №1. – С. 23-33.

10. Тарасенко М. Ways to save fuel and energy resources in daily graft / М. Тарасенко, К. Козак // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2017. – №1 (85). – С. 101-108.

11. Alsafasfeh M, Abdel-Qader I, Bazuin B, Alsafasfeh Q, Su W. Unsupervised fault detection and analysis for large photovoltaic systems using drones and machine vision. *Energies*, 2018; 11: 2252. doi:10.3390/en11092252.

12. Lee S, An KE, Jeon BD, Cho KY, Lee SJ, Seo D. Detecting faulty solar panels based on thermal image processing. Detecting faulty solar panels based on thermal image processing. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, USA, 12–14 January 2018; 1–2.

13. Guide to the Use of Thermal Imaging Cameras in the Construction Industry and When Working with Renewable Energy Sources. Available online: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_EN.pdf (accessed on 1 May 2020).

14. Henry C, Poudel S, Lee S-W, Jeong H, Automatic detection system of deteriorated pv modules using drone with thermal camera, *Appl. Sci.* 10. 2020; 3802. <https://doi.org/10.3390/app10113802>.

15. Herraiz AH, Marugan AP, Marquez FPG. Optimal productivity in solar power plants based on machine learning and engineering management, in: *International Conference on Management Science and Engineering Management*, Springer. 2018; 983-994.

16. Manno D, Cipriani G, Ciulla G, Di Dio V, Guarino S, Brano VL, Deep learning strategies for automatic fault diagnosis in photovoltaic systems by thermographic images, *Energy Convers. Manag.* 2021; 241: 114315. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114315>.

17. Grimaccia F, Aghaei M, Mussetta M, Leva S, Quater PB, Planning for pv plant performance monitoring by means of unmanned aerial systems (uas), *Int. J. Energy Environ. Eng.* 2015; 6: 47-54.
18. Leloux J, Narvarte L. Advanced PV modules inspection using multirotor UAV, in: 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2015; 1-5. <https://orcid.org/0000-0002-6289-7605>.
19. Gallardo-Saavedra S, Hernandez-Callejo L, Duque-Perez O, Technological review of the instrumentation used in aerial thermographic inspection of photovoltaic plants, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018\$ 93: 566-579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.027>.
20. Aghaei M, Dolara A, Leva S, Grimaccia F, Image resolution and defects detection in PV inspection by unmanned technologies, in: 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 17-21 July 2016. 2016; 1-5. DOI: 10.1109/PESGM.2016.7741605.
21. Wihartiko F, Wijayanti H, Virgantari F. Performance comparison of genetic algorithms and particle swarm optimization for model integer programming bus timetabling problem, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2018. 012020. DOI 10.1088/1757-899X/332/1/012020.
22. Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review, *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens.* 2014; 92: 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
23. Koval V, Martsenko S, Zin M. Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.
24. Geletukha G., Zheliezna T. Prospects for Bioenergy Development in Ukraine: Roadmap until 2050 // *Ecological Engineering & Environmental Technology*. – 2021. –V. 22 (5). – P. 73–81. <https://doi.org/10.12912/27197050/139346>.