

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень


Система моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з
використанням БПЛА
Назва теми

КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ
Шифр


Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

Виконав: студент IV курсу, група KI2-21-2  Артем КУЦЬКИЙ
Ініціали, прізвище

Керівник  Богдан САВЕНКО
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер  Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
зав. кафедри комп'ютерної
інженерії та інформаційних
систем

 Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

« 9 » червня 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень БАКАЛАВР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2025 р.



ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Артему КУЦЬКОМУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Система моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА

Керівник проекту (роботи) Богдан САВЕНКО, д.ф.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. №23

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 12.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Система моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА

Проектування системи моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з

використанням БПЛА

Реалізація системи моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з

використанням БПЛА

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Архітектура

системи

моніторингу

Архітектура для кіберфізичної системи

Схема результатів моніторингу

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Тетяна КИСІЛЬ, доцент кафедри КІС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КІС		

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напряму дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	11.02.2025	виконано
3	Робота над розділом 1 - дослідження предметної області та постановка задачі	18.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 - проектування системи моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА	22.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 - реалізація системи моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА	20.05.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	22.05.2025	виконано
7	Попередній захист ВКР	23.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Підпис

Артем КУЦЬКИЙ
Ініціали, прізвище





Керівник роботи

Підпис

Богдан САВЕНКО
Ініціали, прізвище

№ р я д к а	ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л · л и с т і в	№ ек з	П р и м і т к а
			<u>Текстові документи</u>			
1		КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Пояснювальна записка	57		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КВРКІ 210241.21.02.59 Е8	Архітектура системи моніторингу	1		
3		КВРКІ 210241.21.02.59 Е8	Архітектура для кіберфізичної системи	1		
4		КВРКІ 210241.21.02.59 Е8	Схема результатів моніторингу	1		

КВРКІ 210241.21.02.59 ВП

Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Відомість проєкту		
Розробив		Куцький А.			Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Савенко Б.			У	1	1
Н. конпр.		Кисіль Т.М.		02.06.24	ХНУ, КІ2-21-2		
Затв.		Павлова О.О.		02.06.25			

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Система моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА».

Автор роботи: Артем КУЦЬКИЙ

Керівник роботи: Богдан САВЕНКО

Пояснювальна записка: 57 с., 21 рис., 7 табл., 3 дод., 42 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

БПЛА, СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ, АРХІТЕКТУРА, МОНІТОРИНГ, БАЗА ДАНИХ, СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, ДАХОВІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.

Кваліфікаційну роботу присвячено розробці та дослідженню системи моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням безпілотних літальних апаратів, як елемента кіберфізичної системи. Проаналізовано предметну область, виявлено наявні проблеми та завдання.

Метою роботи є визначення умов застосування обладнання БПЛА та оцінка механізмів обробки інформації у системі моніторингу з розвідувальним безпілотним літальним апаратом для ефективного виявлення об'єктів. Об'єктом дослідження є функціонування моніторингових елементів розвідувального БПЛА. Предметом дослідження є оцінка режимів їх застосування.

У роботі спроектовано архітектуру системи моніторингу, визначено вимоги до апаратних та програмних компонентів, включаючи базу даних. Досліджено принципи інтеграції та сценарії експлуатації. Використано метод систематичного огляду літератури для аналізу предметної області. Результати роботи можуть бути застосовані для підвищення ефективності діагностики стану сонячних панелей.



Підпис студента





30.05.25

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДАХОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ЩОДО ЇЇ ПОКРАЩЕННЯ	5
1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань	5
1.2 Аналіз існуючих підходів до моніторингу сонячних панелей з використанням БПЛА та постановка задачі.....	9
1.3 Висновки до першого розділу.....	17
2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДАХОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА	19
2.1 Архітектура, визначення підсистем та функціональне призначення компонентів системи.....	19
2.2 Апаратне забезпечення системи моніторингу	24
2.3 Програмне забезпечення та алгоритми обробки даних моніторингу	28
2.4 Інтеграція системи та сценарії експлуатації.....	32
2.5 Висновки до другого розділу	38
3. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДАХОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА	41
3.1 Опис та розробка програмного забезпечення для системи	41
3.2 Обробка, аналіз та інтерпретація отриманих даних	47
3.3 Тестування працездатності системи.....	53
3.4 Висновки до третього розділу.....	58
ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	62
ДОДАТОК А	67
ДОДАТОК Б	68
ДОДАТОК В	69

КвРКІ 210241.21.02.59 ПЗ

Зм.	Арк.	Нолокум.	Підпис	Дата			
Виконав		Куцький А.С.			Літера	Аркуш	Аркушів
Перевіс.		Савенко Б.О.					
Н.контр.		Кисіль Т.М.		2021	ХНУ КІ2-21-2		
Затвер.		Павлова О.О.		2021			

Система моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА.
Пояснювальна записка

ВСТУП

Сучасний розвиток відновлюваної енергетики, зокрема сонячної, значною мірою ґрунтується на впровадженні новітніх технологій контролю та управління станом обладнання. Серед різновидів фотоелектричних установок значне поширення отримали дахові сонячні електростанції, які встановлюються як на житлових, так і на комерційних об'єктах.

Забезпечення їхньої ефективної та безперебійної роботи потребує постійного моніторингу стану панелей, виявлення дефектів, зменшення продуктивності, перегрівів та інших аномалій.

У цьому контексті використання безпілотних літальних апаратів у складі кіберфізичних систем набуває особливої актуальності. Завдяки високій маневровості, можливості оснащення інфрачервоними та оптичними сенсорами, а також автономному збору та передачі даних, БПЛА дозволяють суттєво підвищити оперативність і точність моніторингових процесів.

Така система дозволяє здійснювати інспекцію дахових сонячних панелей без залучення обслуговуючого персоналу, що зменшує ризики для людей та витрати на технічне обслуговування.

Актуальність дослідження полягає в потребі вдосконалення засобів автоматизованого моніторингу дахових фотоелектричних установок, зокрема розробки та впровадження ефективної системи, що використовує БПЛА як платформу збору даних у складі кіберфізичної інфраструктури. Забезпечення своєчасного виявлення дефектів та зниження продуктивності дозволяє оптимізувати експлуатацію сонячних електростанцій, збільшити їхній термін служби та економічну доцільність.

Метою дипломної роботи є визначення умов та особливостей застосування БПЛА для моніторингу дахових сонячних панелей, а також оцінка механізмів обробки інформації у кіберфізичній системі адаптивного моніторингу для забезпечення високої ефективності виявлення дефектів.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єктом дослідження є процес моніторингу дахових сонячних електростанцій за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). З огляду на зростаюче поширення сонячної енергетики в приватному та промисловому секторах, своєчасний контроль технічного стану панелей стає критичним для забезпечення їх ефективної та безперебійної роботи..

Предметом дослідження є засоби та режими застосування моніторингових елементів БПЛА у складі кіберфізичної системи для контролю стану сонячних панелей. Особлива увага приділяється вибору відповідних сенсорів (оптичних, інфрачервоних, мультиспектральних тощо), способам збору та передачі даних, а також методам їх інтелектуального аналізу для виявлення несправностей або зниження ефективності фотомодулів

Структура роботи включає огляд сучасних технологій моніторингу фотоелектричних установок, проектування архітектури системи з використанням БПЛА, вибір сенсорного обладнання та алгоритмів обробки даних, а також проведення експериментальної оцінки ефективності функціонування розробленої системи.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДАХОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ЩОДО ЇЇ ПОКРАЩЕННЯ

1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань

Сучасна світова енергетика демонструє стійку тенденцію до переходу на відновлювані джерела енергії, серед яких особливе місце посідає сонячна енергія. Виробництво електроенергії за допомогою фотоелектричних установок, чи то великомасштабних наземних станцій, чи розподілених дахових систем, стало значним чинником в енергетичному балансі багатьох країн [14, 15]. Однак ефективне та стабільне функціонування таких систем протягом планованого терміну експлуатації, що може перевищувати 25 років, потребує систематичного і високоякісного технічного обслуговування та моніторингу [2, 22].

Це критично важливо для підтримання максимальної ефективності генерації, пролонгації терміну служби компонентів та підтримки безпеки експлуатації фотоелектричних систем. У даному параграфі розглядаються базові принципи, потреба, типові дефекти фотоелектричних панелей, традиційні методи їх моніторингу та аналізуються їхні суттєві обмеження, що створює передумови для пошуку нових підходів [4, 25].

Функціонування фотоелектричних панелей ґрунтується на принципах перетворення енергії сонячного випромінювання безпосередньо в постійний електричний струм. Ефективність цього процесу визначається як характеристиками самих фотоелектричних елементів (комірок, об'єднаних у модуль), так і зовнішніми факторами та станом обладнання [14, 39].

Із плином часу та під впливом різноманітних факторів навколишнього середовища (температурні цикли, волога, механічні навантаження, ультрафіолетове випромінювання, вітер) сонячні панелі та їхні компоненти (рами, з'єднання, кабелі) можуть набувати різноманітних дефектів або несправностей. Ці

					КвРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дефекти можуть проявлятися як одразу після монтажу (виробничі дефекти), так і з'являтися під час експлуатації (дефекти, викликані впливом середовища, неякісним монтажем або процесами деградації) [19, 27].

До основних типів дефектів та несправностей сонячних панелей, що суттєво впливають на їх продуктивність та надійність, відносять:

1. Фізичні пошкодження: тріщини та мікротріщини на скляній поверхні або у самих кремнієвих комірках, сколи, пошкодження захисної плівки або задньої поверхні, дефекти герметизації, корозія або деформація рам та розподільчих коробок. Мікротріщини є особливо підступними, оскільки їх не видно неозброєним оком, але вони можуть зростати і з часом призводити до від'єднання сегментів комірок, що проявляється як "гарячі точки".

2. Термічні аномалії: є візуальним проявом проблем, що викликають надмірне нагрівання окремих ділянок панелі. Найпоширеніші причини:

1) "Гарячі точки": локальний перегрів окремих комірок або їхніх частин, що часто виникає через затінення, мікротріщини, виробничі дефекти або шунтуючі несправності.

2) Несправності діодів: діоди призначені для пропускання струму, оминаючи затінений або пошкоджений сегмент стрінгу комірок. Однак їхня несправність може спричинити нагрівання самого діода або призвести до зворотного струму через затінені комірки, викликаючи їхній перегрів.

3) Проблеми з'єднань: ослаблення або корозія паяних з'єднань всередині панелі чи в розподільчій коробці, а також неякісні з'єднання кабелів можуть викликати підвищений опір і локальний нагрів.

4) Проблеми зі стрінгами: обрив у ланцюзі комірок або несправність у частині стрінгу.

5) Забруднення поверхні: накопичення пилу, піску, пташиного посліду, листя, промислових викидів на скляній поверхні панелі. Забруднення є найчастішою причиною зниження виробітку. Навіть тонкий шар пилу може

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшити кількість світла, що досягає комірок, а нерівномірне забруднення може спричинити локальне затінення та появу "гарячих точок".

б) Ефекти деградації: хімічні або фізичні зміни в матеріалах панелі з часом під впливом вологи, температури та електричного поля.. До них належать:

1. Потенціально-індукована деградація: зниження продуктивності панелі, викликане взаємодією високої напруги, температури та вологості.

2. Світло-індукована деградація: початкова деградація, що відбувається одразу після виходу панелі на сонце.

Своєчасне виявлення та усунення цих дефектів є критично важливим. Наприклад, "гарячі точки" можуть призвести не тільки до втрати виробітку, але й викликати пожежу. Невидимі мікротріщини можуть з часом перетворитися на серйозніші пошкодження, зменшуючи термін служби панелі. Недооцінка впливу забруднення може призвести до суттєвих, хоч і тимчасових, втрат генерації. За оцінками різних досліджень, до 5-30% потенційного виробітку сонячної електростанції може бути втрачено через різні типи дефектів та неефективне обслуговування [4, 12, 27].

Традиційні методи моніторингу, які широко використовувалися до появи більш сучасних технологій, ґрунтувалися переважно на ручних процедурах. Візуальний огляд технічним персоналом був основним способом виявлення явних фізичних пошкоджень або значних забруднень. Використання портативних вимірювальних приладів, таких як мультиметри для вимірювання напруги та струму, та ручних тепловізійних камер, дозволяло діагностувати певні проблеми. Тепловізія (термографія), зокрема, є цінним інструментом для виявлення прихованих термічних аномалій, які сигналізують про наявність електричних несправностей [5, 22]. Суть термографії полягає у реєстрації інфрачервоного випромінювання поверхні об'єкта, інтенсивність якого пов'язана з його температурою. Панелі, що функціонують коректно, зазвичай мають рівномірний розподіл температури, тоді як дефектні ділянки (що працюють як опір або не генерують енергію і працюють під зворотною напругою) проявляються як

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

локальні підвищення температури - "гарячі точки". Вбудовані системи моніторингу (SCADA, системи на рівні інверторів) надавали агреговані дані про загальний виробіток або показники по стрінгах, дозволяючи ідентифікувати проблеми на рівні групи панелей, але не вказували на конкретну несправну панель [4, 22].

Процес ручної інспекції зазвичай був трудомістким: вимагав присутності персоналу безпосередньо на об'єкті, переміщення між рядами панелей (що для великих наземних сонячних електростанцій означає кілометри проходки) або на даху. Огляд та сканування кожної панелі тепловізійною камерою (що вимагало врахування кута зйомки відносно поверхні панелі та відбиття від неї сонячного світла) був тривалим і вимагав високої кваліфікації термографіста. Запис результатів часто вівся вручну або у простих електронних таблицях, без точної геопросторової прив'язки, що ускладнювало локалізацію проблеми та планування подальших ремонтних робіт [10, 25].

Незважаючи на свою актуальність для певних завдань (наприклад, детальної перевірки підозрілої панелі вручну після попередньої діагностики), традиційні методи мають суттєві обмеження при застосуванні до об'єктів середнього та великого масштабу, а особливо до численних та часто важкодоступних дахових фотоелектричних систем:

1) Низька швидкість та масштабованість: обстеження тисяч або десятків тисяч панелей на великих сонячних електростанціях ручними методами триває днями або тижнями, що робить регулярний моніторинг надто дорогим та неефективним.

2) Високі ризики для персоналу: робота на висоті (на дахах), на схилах, у щільній забудові (де багато перешкод), а також на великих відкритих територіях під прямим сонцем пов'язана зі значними ризиками травмування (падіння, ураження електричним струмом, перегрів). Специфіка дахових установок (різноманітні кути нахилу, нерівні поверхні, наявність вентиляційних систем, кабельних лотків, антен, димоходів, що створюють перешкоди та підвищують

ризик падіння чи спіткання) ще більше ускладнює безпечний доступ до кожної панелі.

3) Обмежена повнота та точність даних: ручний огляд часто не дозволяє виявити мікротріщини чи слабо виражені термічні аномалії. Ручна термографія може мати низьку точність, якщо не дотримані всі умови зйомки (відстань, кут, умови освітлення). Важко отримати повне "здоров'я" всього об'єкта в один момент часу.

4) Відсутність просторового контексту: отримані дані рідко мають точну прив'язку до координат кожної несправної панелі, що ускладнює подальше адміністрування та ремонт.

5) Суб'єктивність та якість звітів: результати інспекції можуть варіюватися залежно від досвіду та ретельності інспектора, а звіти часто є менш структурованими та наочними, ніж ті, що створюються автоматизовано.

Зростаючий масштаб сонячної енергетики та збільшення кількості встановлених фотоелектричних систем, зокрема розподілених дахових установок у містах, посилили необхідність у розробці більш швидких, безпечних, автоматизованих та об'єктивних методів моніторингу. Традиційні підходи виявилися недостатньо ефективними для забезпечення необхідного рівня діагностики на сучасному етапі розвитку галузі, що створило вагому передумову для впровадження інноваційних технологій, серед яких ключове місце посіли безпілотні літальні апарати.[16]

1.2 Аналіз існуючих підходів до моніторингу сонячних панелей з використанням БПЛА та постановка задачі

Револьюційний крок у моніторингу великих інфраструктурних об'єктів, включно із сонячними електростанціями, був зроблений завдяки стрімкому розвитку безпілотних літальних апаратів та супутніх сенсорних технологій. Інтеграція на борту БПЛА високоякісних радіометричних тепловізійних та

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

візуальних камер, а також систем високоточного геопозиціонування, відкрила можливості для швидкого, безпечного та високодеталізованого дистанційного обстеження фотоелектричних систем. БПЛА дозволяє за короткий час покривати значні площі або обстежувати численні дахові інсталяції, збираючи тисячі знімків із точною геоприв'язкою [1, 4, 11]. Рисунок 1.1 ілюструє типовий сценарій використання БПЛА для інспекції дахової сонячної електростанції.

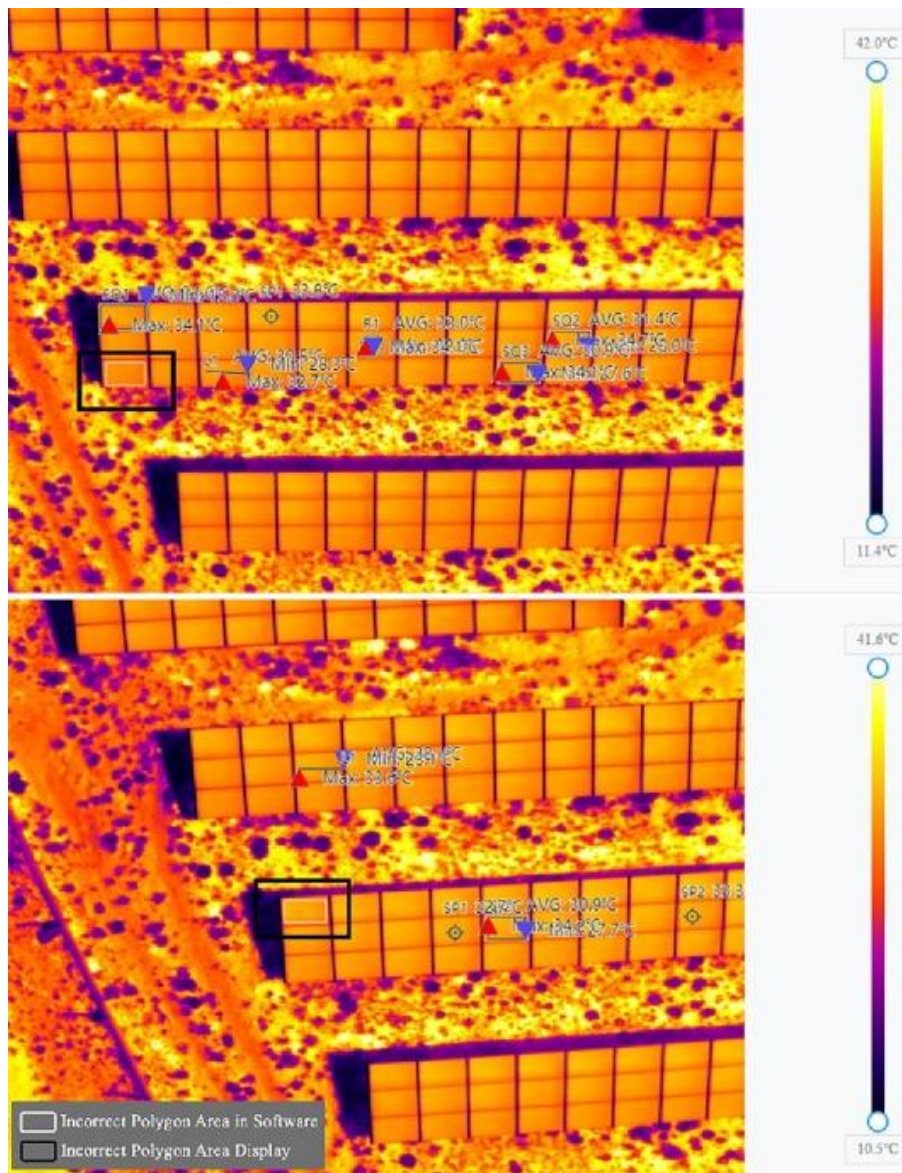


Рисунок 1.1 – БПЛА з тепловізійною камерою під час інспекції сонячних панелей на даху[7]

Сучасна система моніторингу сонячних панелей з використанням БПЛА являє собою комплексне рішення, що складається з низки взаємопов'язаних апаратних та програмних компонентів:

1) безпосередньо безпілотний літальний апарат, як правило, мультироторного типу для інспекції дахових сонячних електростанцій завдяки його маневреності;

2) комплекс сенсорів на борту, основним єдинням є радіометрична тепловізійна камера та візуальна камера високої роздільної здатності, що монтується на стабілізований підвіс;

3) системи навігації та геопозиціонування (GNSS, часто з технологією RTK/PPK для високої точності);

4) бортовий обчислювальний модуль (для керування сенсорами, попередньої обробки даних) та модуль зберігання даних;

5) наземна станція керування для планування та контролю місії, моніторингу параметрів польоту та зв'язку з БПЛА;

6) спеціалізоване програмне забезпечення для планування місій, збору та обробки даних (включно з фотограмметрією для створення ортофотопланів та 3D-моделей) та, що найважливіше, аналітичне програмне забезпечення для автоматизованого виявлення та класифікації дефектів;

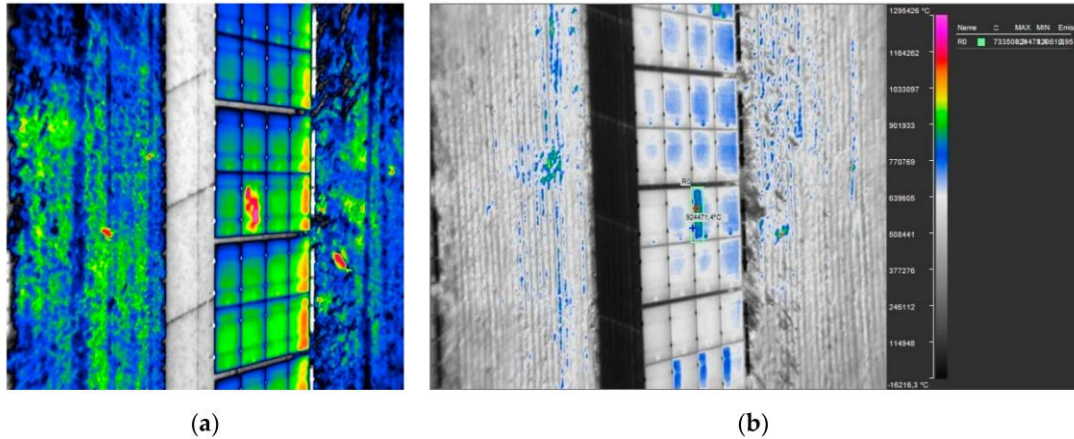
7) модулі візуалізації результатів та генерації звітів.

Процес інспекції зазвичай включає автоматизований політ за запланованим маршрутом з одночасною синхронною зйомкою візуальних та тепловізійних зображень з високим перекриттям кадрів. Отримані дані потім піддаються попередній обробці (зшивання в ортофотоплани, геоприв'язка, корекція), а далі - автоматизованому аналізу за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору та машинного навчання. Ці алгоритми навчені розпізнавати типові патерни термічних аномалій на теплових знімках та видимих пошкоджень чи забруднень на RGB-зображеннях. На рисунку 1.2 (а) показано тепловізійний знімок сонячної панелі,

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зроблений безпілотним літальним апаратом. Цей знімок є прикладом виявлених за допомогою БПЛА дефектів.

На рисунку 1.2 (b) зображення категоризовано за виявленою зоною поломки. Це означає, що на тепловізійному знімку, отриманому БПЛА, були ідентифіковані та класифіковані різні типи дефектів або пошкоджень сонячної панелі.



(a) - тепловізійний знімок сонячної панелі, зроблений БПЛА, (b) - зображення категоризовано за виявленою зоною поломки.

Рисунок 1.2 – Приклад дефекту, виявленого за допомогою БПЛА[3]

Результати аналізу включають локалізацію дефектів на цифровій карті або моделі об'єкта, їх класифікацію за типом та оцінку критичності. На основі цих даних формується детальний звіт для технічного персоналу. Деякі сучасні системи використовують методи фотограмметрії для створення детальних 3D-моделей об'єкта - "цифрових двійників" сонячних електростанцій [9, 23]. Це дає можливість операторам візуалізувати дані про продуктивність, температуру або пошкодження безпосередньо на 3D-моделі, значно спрощуючи і прискорюючи процес виявлення та усунення проблем. Завдяки такому підходу, персонал може краще планувати технічне обслуговування, оптимізувати роботу панелей та мінімізувати простої, що в кінцевому підсумку підвищує загальну ефективність сонячної електростанції та її прибутковість. Використання цифрових двійників є значним кроком до автоматизації та інтелектуалізації управління сонячними активами.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

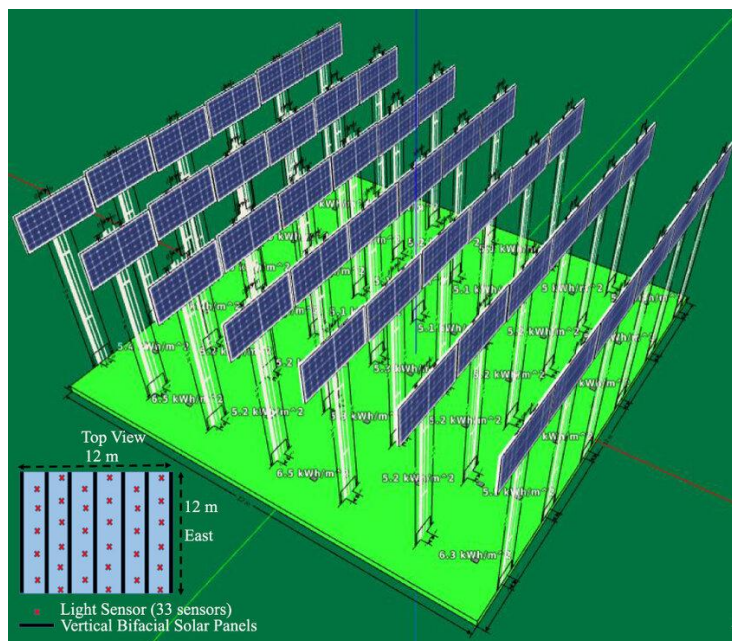


Рисунок 1.3 – Приклад цифрового двійника сонячної електростанції, створеного за даними БПЛА[22]

Застосування БПЛА для моніторингу фотоелектричних систем надає суттєві переваги порівняно з традиційними підходами. Це значно скорочує час та операційні витрати на інспекцію, підвищує безпеку персоналу шляхом усунення потреби роботи на висоті, забезпечує доступ до важкодоступних ділянок та надає об'єктивні, високодеталізовані та просторово прив'язані дані про стан кожної панелі. Це уможлиблює перехід від реактивного до прогностичного обслуговування, дозволяючи виявляти проблеми на ранніх стадіях та планувати ремонти завчасно [10, 25]. Сучасні системи моніторингу фотоелектричних (PV) установок за допомогою БПЛА (безпілотних літальних апаратів), як схематично зображено на малюнку, демонструють значну функціональну різноманітність та високий рівень автоматизації. Дрон, оснащений тепловізійною камерою, здійснює обліт сонячної електростанції, збираючи тепловізійні зображення панелей.

Ці дані, що вказують на потенційні "гарячі точки" або інші дефекти, передаються в хмарне сховище і далі до диспетчерської. У диспетчерській оператори аналізують отриману інформацію на моніторах, приймаючи рішення

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

щодо подальших дій з обслуговування або ремонту. Такий підхід забезпечує ефективний і швидкий вияв несправностей, оптимізуючи роботу сонячної електростанції.

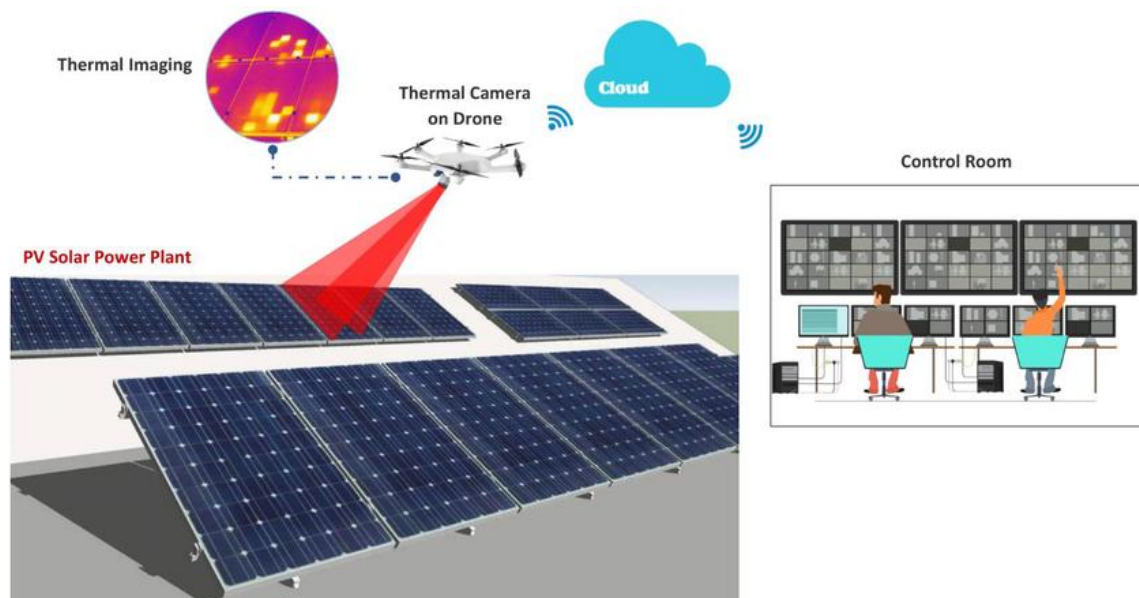


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення компонентів системи моніторингу фотоелектричних за допомогою БПЛА: дрон, камери, GPS, наземна станція, хмарна платформа аналізу[42]

Залежно від масштабу об'єкта, це можуть бути рішення для великомасштабних наземних станцій, де важлива швидкість покриття великих площ, або системи, оптимізовані для дахових установок, що вимагають високої маневреності та точності в обмеженому просторі. За рівнем автоматизації існують рішення від ручного або напівавтоматичного аналізу даних експертом-термографістом до повністю автоматизованих платформ, що використовують складні алгоритми машинного та глибокого навчання для розпізнавання дефектів. Також розрізняють системи за інтеграцією сенсорів (від однієї ІЧ-камери до мультисенсорних комплексів, що об'єднують дані з різних джерел за допомогою методів об'єднання даних). Передові технологічні підходи включають спеціалізовані ШІ-орієнтовані системи для масового автоматичного аналізу, комплексні платформи, що будують цифрові двійники, та інтегровані системи, що

намагаються комбінувати дані з БПЛА та стаціонарних IoT-датчиків для глибшого розуміння стану обладнання [6, 17, 22].

Однак, попри всі досягнення, існуючі системи моніторингу сонячних панелей за допомогою БПЛА стикаються з низкою викликів та обмежень. Перш за все, це відносно висока початкова вартість професійного обладнання та спеціалізованого програмного забезпечення, що може бути бар'єром для впровадження на невеликих об'єктах. Робота БПЛА залежить від погодних умов: сильний вітер, опади, туман унеможливають польоти, а для якісної термографії необхідний певний рівень інсоляції та відсутність хмарності або опадів. Генерація величезних обсягів даних (терабайти для великих об'єктів) створює проблеми зі зберіганням, передачею та вимагає потужних обчислювальних ресурсів для обробки. Хоча алгоритми штучного інтелекту демонструють хороші результати, їх точність та надійність ще не є абсолютною, особливо при виявленні рідкісних або складних комбінованих дефектів, а також існує проблема пояснюваності рішень штучного інтелекту.[26]

Окремо слід виділити специфічні виклики, пов'язані з моніторингом дахових електростанцій. На відміну від рівних полів наземних сонячних електростанцій, дахи мають складну геометрію, численні перешкоди (вентиляційні шахти, комунікації, антени), різноманітні кути нахилу та орієнтацію панелей, обмежений простір для маневру БПЛА. Це ускладнює планування автономних польотів та може впливати на якість зйомки. Термічний фон покрівлі відрізняється від ґрунту і може впливати на коректність інтерпретації теплових даних. Необхідність виконувати зйомку з меншої висоти для отримання високої деталізації (що особливо важливо для дахів) призводить до більшої кількості знімків і зростання обсягу даних для покриття тієї ж площі, що й на великій висоті. Також існують суворіші регуляторні обмеження на польоти БПЛА в урбанізованих зонах. Необхідність високої кваліфікації операторів БПЛА та спеціалістів з інтерпретації діагностичних даних також залишається важливим фактором [1, 5, 9].

Наявність цих викликів та недоліків вказує на необхідність подальших досліджень та вдосконалення систем моніторингу, зокрема у частині адаптації

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алгоритмів аналізу до специфіки дахових об'єктів, підвищення точності автоматизованого виявлення дефектів, оптимізації процесів обробки великих масивів даних, а також інтеграції різних джерел інформації для більш повної та достовірної діагностики стану сонячних панелей. Саме ці аспекти визначають актуальність обраної теми.[13, 28]

На основі проведеного аналізу сучасних систем моніторингу сонячних панелей з використанням БПЛА було встановлено, що незважаючи на значні переваги цієї технології, існуючі рішення стикаються з проблемами, пов'язаними зі складністю автоматизованого виявлення певних типів дефектів, необхідністю обробки значних обсягів даних та специфікою застосування до дахових електростанцій, що вимагають підвищеної маневреності БПЛА та адаптованих методів аналізу даних [12, 29]. Це обмежує загальну ефективність та поширення БПЛА-моніторингу на об'єктах такого типу. Удосконалення процесів діагностики дефектів є ключовим для забезпечення максимальної продуктивності та надійності дахових фотоелектричних систем.

Таким чином, основною метою даної дипломної роботи визначено розробку та детальне дослідження елементів сучасної системи моніторингу стану сонячних панелей, що розташовані на дахових електростанціях, із залученням технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Ця система має на меті значно покращити автоматизоване виявлення потенційних дефектів або несправностей, провести їх точний аналіз та створити основу для ефективного планування та виконання необхідних коригувальних дій у подальшому.

Для досягнення поставленої мети у роботі поставлено наступні завдання:

а) Провести аналіз теоретичних засад роботи та деградаційних процесів сонячних панелей, а також існуючих методів їх моніторингу з акцентом на використання БПЛА, визначити переваги та недоліки існуючих рішень).

б) Спроекувати функціональну та архітектурну структуру системи моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій на базі БПЛА та визначити вимоги до її апаратних та програмних компонентів.

в) Розробити алгоритм автоматизованого виявлення типових дефектів сонячних панелей за даними візуальної та/або тепловізійної зйомки з БПЛА.

г) Реалізувати програмно розроблений алгоритм та відповідні модулі для обробки, аналізу та візуалізації даних моніторингу.

д) Провести експериментальну оцінку ефективності та точності розроблених алгоритмів та програмного забезпечення на тестових даних або реальному об'єкті.

е) Проаналізувати отримані результати та сформулювати висновки щодо можливостей застосування та подальшого вдосконалення розроблених елементів системи.

1.3 Висновки до першого розділу

У першому розділі роботи було досліджено теоретичні засади та актуальність проблеми моніторингу стану сонячних панелей дахових електростанцій. Виявлено, що традиційні методи інспекції, що базуються на ручному візуальному огляді та портативних приладах, є високовартісними, трудомісткими, небезпечними та недостатньо ефективними, особливо для великомасштабних та дахових систем. Визначено основні типи дефектів панелей, такі як термічні аномалії, фізичні пошкодження та забруднення, і підтверджено їхній негативний вплив на продуктивність та безпеку фотоелектричних установок. Наростаючий обсяг встановлених потужностей вимагає впровадження сучасних, автоматизованих та безпечних методів діагностики. Таким чином, існують значні підстави для пошуку альтернативних рішень у сфері моніторингу.

Аналіз сучасного стану моніторингу з використанням БПЛА показав, що ця технологія є потужним інструментом для вирішення проблем традиційних підходів. Використання БПЛА з високоякісними сенсорами дозволяє швидко та безпечно збирати великі обсяги геоприв'язаних візуальних та теплових даних. Програмні комплекси забезпечують обробку цих даних, включаючи фотограмметрію та автоматизований аналіз із застосуванням алгоритмів

машинного навчання для виявлення дефектів. Існуючі системи демонструють переваги у швидкості, безпеці та об'єктивності порівняно з ручними методами. На ринку представлені різні рішення, від простих систем з ручним аналізом до складних автоматизованих платформ, включаючи побудову цифрових двійників об'єктів.

Попри значні досягнення, сучасні БПЛА-системи моніторингу сонячних панелей мають суттєві обмеження, особливо стосовно дахових електростанцій. Висока вартість обладнання та ПЗ, залежність від погодних умов та значні обсяги даних створюють виклики. Найбільш критичними проблемами залишаються недостатня точність та надійність автоматизованого виявлення всіх типів дефектів в різноманітних умовах зйомки, а також складнощі адаптації рішень до специфіки дахів (перешкоди, різний нахил панелей, особливості термічного фону). Вирішення цих питань, зокрема підвищення точності алгоритмів автоматизованої діагностики, є необхідною умовою для повного розкриття потенціалу БПЛА-технологій у моніторингу дахових сонячних електростанцій та формує актуальну науково-технічну задачу для подальшого дослідження та розробки.

					КвРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРІНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДАХОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА

2.1 Архітектура, визначення підсистем та функціональне призначення компонентів системи

На основі результатів аналізу стану проблеми моніторингу сонячних панелей та викликів існуючих рішень на базі БПЛА, а також сформульованої мети та завдань дослідження. У даному розділі буде здійснено проєктування системи моніторингу сонячних панелей на дахових електростанціях з використанням БПЛА. Етап проєктування є фундаментальним, оскільки визначає функціональну та логічну структуру системи, формує вимоги до апаратних засобів, обґрунтовує вибір ключових технологій та опис принципів роботи програмного забезпечення. Якість проєктних рішень має безпосередній вплив на ефективність, точність та надійність кінцевої системи моніторингу.

Здійснено проєктування архітектури програмно-технічного комплексу системи моніторингу сонячних панелей на дахових електростанціях та деталізовано її компоненти. Процес проєктування передбачає визначення функціональної та логічної структури системи, формування вимог та опис принципів роботи програмного забезпечення, що спільно утворюють цілісну систему. Якість архітектурних рішень безпосередньо впливає на ефективність, точність та надійність кінцевої системи моніторингу, що є критично важливим для успішної діагностики стану дахових фотоелектричних установок, подолання виявлених у Розділі 1 недоліків сучасних підходів та відповіді на специфічні виклики міського середовища та експлуатації на дахах.

Враховуючи специфіку задачі, яка передбачає інтеграцію різномірних компонентів - мобільної повітряної платформи з комплексом сенсорів, наземних апаратних засобів для керування та обробки, а також складного програмного забезпечення для аналізу даних - обрано розподілену, модульну архітектуру як

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

найбільш доцільну та гнучку. Такий підхід до проєктування програмно-технічних засобів сприяє підвищенню керованості процесу розробки, полегшує інтеграцію компонентів, забезпечує масштабованість та полегшує подальше супроводження системи. Для візуального представлення загальної структури системи, її основних компонентів та інформаційних потоків між ними, розроблено блок-схему загальної архітектури системи.

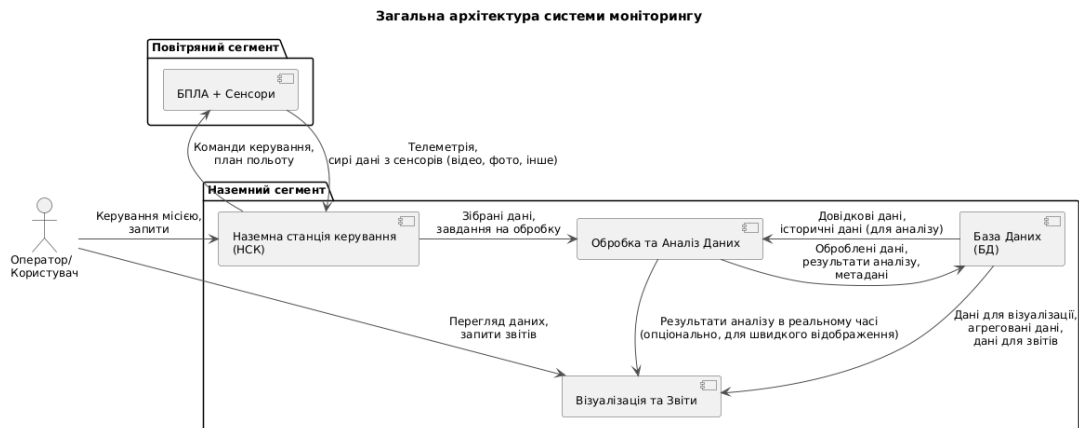


Рисунок 2.1 – Схема загальної архітектури системи моніторингу

Програмно-технічний комплекс системи моніторингу може бути представлений у вигляді сукупності логічно відокремлених функціональних підсистем, кожна з яких виконує специфічні завдання в загальному процесі моніторингу. Структура системи була розроблена шляхом виділення наступних основних підсистем: підсистема повітряного збору діагностичних даних, підсистема наземного керування польотом та завантаження даних, підсистема наземної обробки та інтелектуального аналізу даних, а також підсистема візуалізації результатів та звітності. Визначення функціонального призначення компонентів кожної підсистеми та встановлення принципів їхньої взаємодії є ключовим аспектом проєктування архітектури. Компоненти та основні функції підсистеми повітряного збору діагностичних даних, яка реалізується на борту БПЛА, представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – компоненти та функціональне призначення підсистеми повітряного збору діагностичних даних

Компонент	Функціональне призначення
Безпілотна повітряна платформа	Забезпечення стабільного та керованого руху у просторі, позиціонування та доставка комплексу сенсорів до визначеної зони моніторингу.
Комплекс бортових діагностичних сенсорів	Реєстрація фізичних параметрів панелей. Включає візуальну камеру для отримання оптичних зображень та радіометричну тепловізійну камеру для реєстрації теплового випромінювання, інтегровані на стабілізованому підвісі.
Система навігації та позиціонування	Точне визначення просторових координат та орієнтації БПЛА і, відповідно, положення центрів зйомки, використовуючи дані GNSS, IMU та технології RTK/PPK.
Бортовий обчислювальний блок	Керування роботою сенсорів згідно із заданою програмою польоту, синхронізація отриманих з камер та навігаційної системи даних, первинне структурування інформації та її тимчасове зберігання на бортовому носії.
Бортовий комунікаційний модуль	Забезпечення каналу бездротового зв'язку з наземною інфраструктурою для передачі телеметрії, керуючих сигналів та потокового відео.

Детальніше функціональне призначення та взаємодія компонентів підсистеми повітряного збору даних може бути проілюстрована на схемі функціонування бортового комплексу.

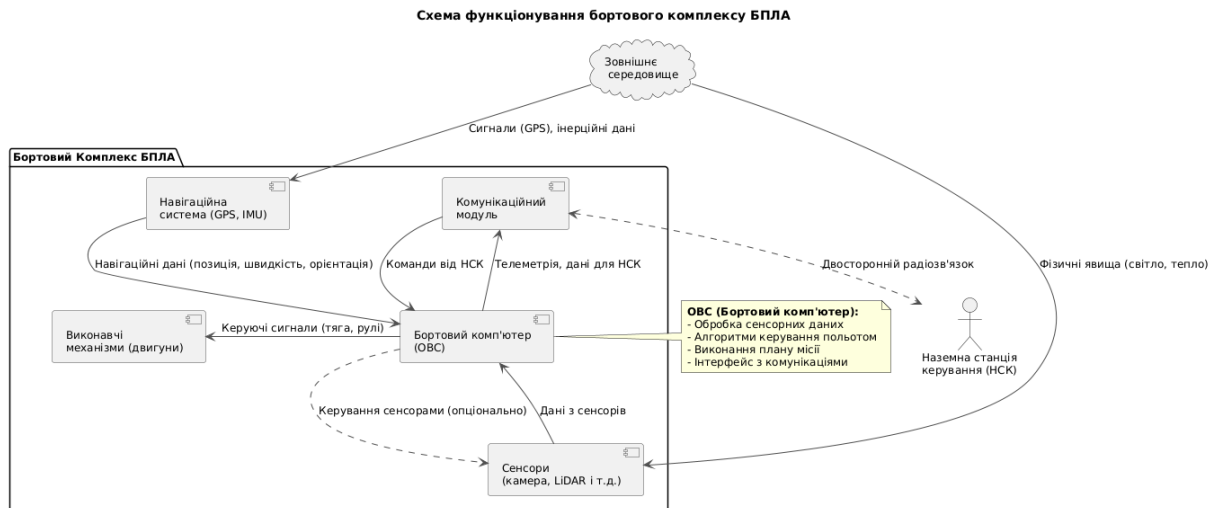


Рисунок 2.2 – Схема функціонування бортового комплексу, що показує взаємозв'язок між БПЛА, сенсорами, навігаційною системою, бортовим комп'ютером та комунікаційним модулем.

Підсистема наземного керування польотом та завантаження даних забезпечує операційне управління повітряною платформою під час виконання місії та перенесення зібраних даних на наземні ресурси. До її складу входять апаратний термінал - наземна станція керування (НСК) з програмним забезпеченням для планування та керування; наземний комунікаційний модуль; програмне забезпечення планування місії та керування польотом; а також модуль завантаження даних з верифікацією цілісності.

Підсистема наземної обробки та інтелектуального аналізу даних визначена як центральний програмно-апаратний елемент системи, що виконує трансформацію сирих візуальних та тепловізійних даних у структуровану діагностичну інформацію. Її реалізація потребує високопродуктивних обчислювальних ресурсів та включає програмні модулі попередньої обробки (включаючи фотограмметрію та калібрування), інтеграції та вирівнювання даних, автоматизованого аналізу та виявлення дефектів, а також базу даних.

Діаграма потоків даних: Підсистема наземної обробки та аналізу

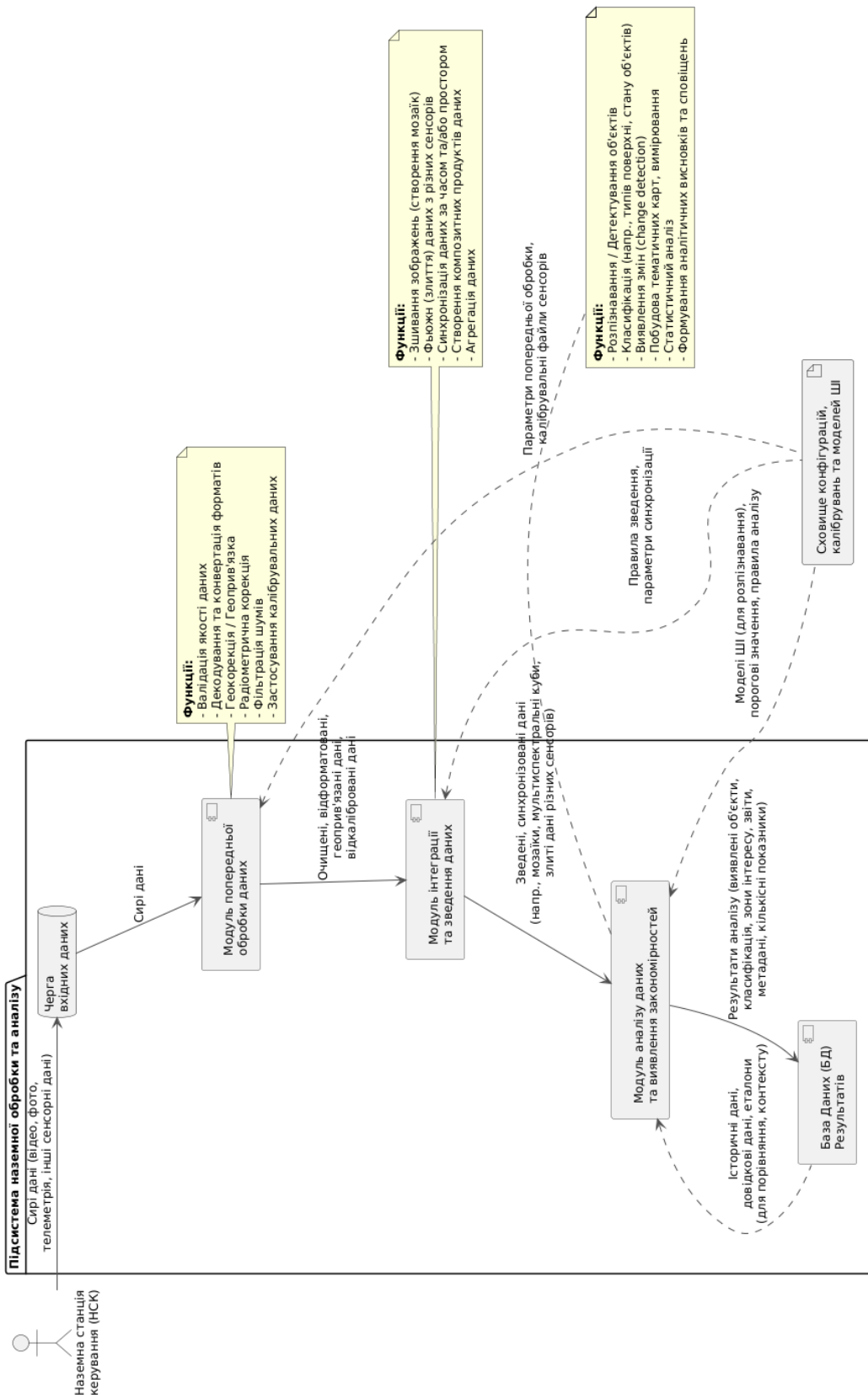


Рисунок 2.3 – Діаграма потоків даних підсистеми наземної обробки та аналізу, що показує етапи від сирих даних до результатів у базі даних, включаючи модулі попередньої обробки, інтеграції та аналізу

Взаємодія між визначеними підсистемами реалізується шляхом обміну даними та керуючими командами через чітко визначені інтерфейси. Принципова схема взаємодії між основними функціональними підсистемами, що відображає потоки даних та керування, представлена на рисунку 2.1. Бездротовий канал зв'язку забезпечує обмін телеметрією та командами між повітряною підсистемою та підсистемою наземного керування під час польоту. Передача значних масивів зібраних сирих даних на оброблювальну підсистему здійснюється, як правило, фізично.

В рамках оброблювальної підсистеми дані послідовно проходять етапи обробки та аналізу, а результати фіксуються у базі даних. Підсистема візуалізації та звітності отримує інформацію з бази даних. Визначена архітектура є модульною та розподіленою, що забезпечує логічну послідовність виконання всіх етапів процесу моніторингу та створює міцну основу для подальшої реалізації та масштабованості системи.

2.2 Апаратне забезпечення системи моніторингу

Проектування апаратної частини системи моніторингу є ключовим етапом, що визначає технічні можливості збору діагностичних даних та ефективність виконання завдань інспектування дахових сонячних електростанцій. Цей параграф деталізує вимоги до апаратних компонентів підсистеми повітряного збору даних та наземного сегменту, включаючи вибір або специфікацію безпілотних літальних апаратів (дронів), бортових сенсорів та допоміжних пристроїв, що забезпечують їх функціонування та взаємодію. Якість та характеристики обраного обладнання безпосередньо впливають на точність, надійність та оперативність всієї системи моніторингу.

Основним компонентом підсистеми повітряного збору даних є безпілотний літальний апарат. При виборі типу та моделі БПЛА для моніторингу дахових фотоелектричних систем необхідно враховувати специфіку умов експлуатації: обмежений простір, наявність численних перешкод (вентиляційні шахти,

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

димоходи, антени, парапети), різний кут нахилу та орієнтацію панелей, а також потенційні обмеження на польоти у міській забудові. Зважаючи на ці фактори, мультироторні БПЛА (квадрокоптери або гексакоптери) визначені як найбільш відповідні для даної задачі. Їх перевагами є можливість вертикального зльоту та посадки без потреби у спеціально підготовлених майданчиках, висока маневреність, здатність до точного зависання на місці (ховерінгу), що дозволяє детально обстежувати окремі ділянки, та можливість виконання польотів за складними, попередньо запрограмованими траєкторіями. Ключові технічні вимоги, що пред'являються до платформи БПЛА, узагальнені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні вимоги до БПЛА для моніторингу

Характеристика	Вимога
Тип БПЛА	Мультироторний (квадрокоптер, гексакоптер)
Вантажопідйомність	Не менше 0.5 - 3 кг (для розміщення комплексу сенсорів та бортового обладнання)
Тривалість польоту	Не менше 20-30 хвилин з корисним навантаженням
Стійкість до вітру	Здатність стабільно функціонувати при швидкості вітру до 10-12 м/с
Навігаційна система	Інтегрована GPS/GNSS з підтримкою технологій високоточного позиціонування
Системи безпеки	Наявність систем обльоту та уникнення перешкод, функція автоматичного повернення до точки зльоту при втраті зв'язку або низькому заряді батареї
Радіус дії керування та передачі відеосигналу	Відповідний розмірам типових об'єктів моніторингу з урахування міської забудови

Ключову роль у зборі діагностичних даних відіграють сенсорні модулі, інтегровані на платформі БПЛА. Основними типами сенсорів, що використовуються для моніторингу фотоелектричних установок, є оптичні (RGB-

камери), інфрачервоні (тепловізори), мультиспектральні або гіперспектральні камери. Вибір конкретного сенсора залежить від поставлених завдань: виявлення дефектів у сонячних елементах, перегрівів, тіньових ефектів або механічних пошкоджень.

Таблиця 2.3 – Вимоги до сенсорних модулів БПЛА

Тип сенсора	Призначення	Технічні характеристики
RGB-камера	Візуальний огляд стану панелей	Роздільна здатність не нижче 12 Мп; стабілізація
Тепловізор	Виявлення дефектів шляхом аналізу температур	Теплова чутливість < 0.05°C; роздільна здатність $\geq 640 \times 480$
Мультиспектральна камера	Аналіз аномалій у відбиванні світла	Спектральні діапазони: NIR, Red Edge тощо

Додатковими елементами бортового обладнання є модулі збереження даних, бортові обчислювальні системи (у разі попередньої обробки інформації на борту) та засоби зв'язку. Забезпечення сумісності між усіма апаратними компонентами, а також живлення всіх елементів із єдиного джерела, є критичним для стабільної роботи платформи.

Наземний сегмент включає в себе робочу станцію оператора з програмним забезпеченням для планування місії, обробки даних та візуалізації результатів. Вимоги до наземної станції охоплюють: підтримку телеметричного зв'язку, інтерфейс для моніторингу параметрів польоту в реальному часі, а також модулі для попереднього аналізу отриманих даних. У деяких випадках доцільним є

використання додаткових джерел даних, зокрема метеостанцій або GNSS-станцій для уточнення геоприв'язки.

До допоміжних пристроїв апаратної частини належать компоненти наземного сегменту. Наземна станція керування (НСК), як правило, реалізується на базі захищеного ноутбука або планшета. Її продуктивність має бути достатньою для стабільної роботи програмного забезпечення планування місій, моніторингу телеметрії та, за потреби, перегляду потокового відео з БПЛА. Обчислювальний ресурс для подальшої наземної обробки та аналізу даних вимагає значно вищих характеристик. Для виконання ресурсоємних задач фотограмметрії та застосування алгоритмів машинного навчання необхідна високопродуктивна робоча станція або сервер, оснащений потужним багатоядерним процесором, значним обсягом оперативної пам'яті, однією або декількома потужними дискретними графічними картами з підтримкою паралельних обчислень, та великим обсягом швидкісного дискового простору. Також до допоміжних пристроїв відносяться портативні зарядні пристрої для акумуляторів БПЛА, запасні акумулятори для забезпечення безперервності інспекцій, калібрувальні мішені, а також засоби безпечного транспортування та зберігання обладнання.

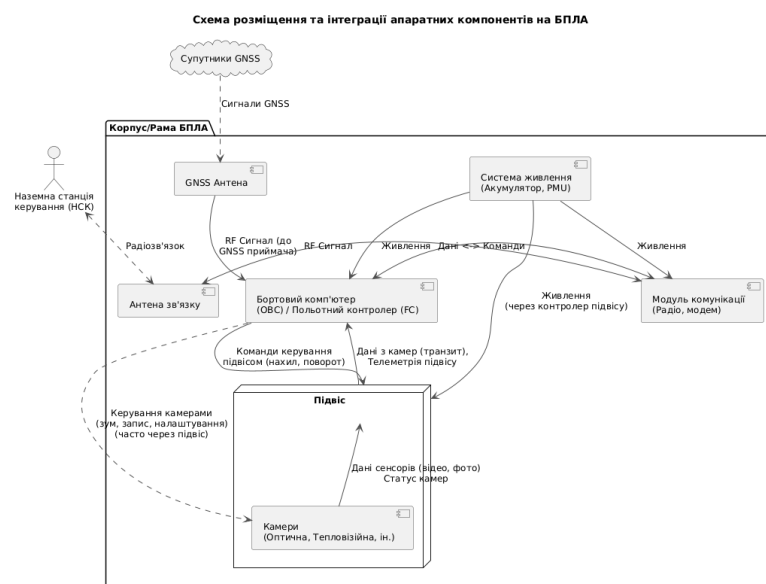


Рисунок 2.4 – Розміщення ключових компонентів на БПЛА

2.3 Програмне забезпечення та алгоритми обробки даних моніторингу

Проектування програмного забезпечення та алгоритмів обробки даних моніторингу є фундаментальним етапом у створенні ефективної системи діагностики сонячних панелей. Цей параграф детально розглядає архітектуру, функціональне призначення та принципи роботи ключових програмних компонентів, що відповідають за керування польотами, збір даних, їх попередню обробку та підготовку до інтелектуального аналізу. Якість та продуманість цих програмних рішень безпосередньо впливає на точність, надійність та оперативність отримання діагностичної інформації.

Програмне забезпечення системи моніторингу функціонально розділяється на декілька ключових компонентів. Першим важливим елементом є програмне забезпечення для планування польотних місій та керування БПЛА. Його проектування спрямоване на створення інтуїтивно зрозумілого графічного користувацького інтерфейсу, що дозволяє оператору ефективно визначати параметри інспекції для конкретної дахової сонячної електростанції. Інтерфейс має надавати інструменти для визначення зони інтересу, наприклад, шляхом імпорту меж об'єкта з зовнішніх картографічних даних або ручного окреслення полігону на інтерактивній карті-підкладці. Враховуючи специфіку дахових сонячних електростанцій, важливим є забезпечення можливості роботи з тривимірними моделями будівель, якщо такі доступні, для точного визначення контурів даху, розташування панелей та потенційних перешкод.

Модуль задання параметрів польоту та зйомки дозволяє оператору встановлювати критичні змінні, що впливають на якість та повноту зібраних даних. До них належать висота польоту БПЛА над об'єктом, яка безпосередньо визначає просторову роздільну здатність отримуваних зображень; поздовжнє та поперечне перекриття кадрів, необхідне для якісної фотограмметричної обробки (типово 60-80% та 40-70% відповідно); швидкість польоту БПЛА, що оптимізується залежно від можливостей камер та вимог до чіткості зображень; а також кут нахилу камери, який для ортофотозйомки зазвичай є надирним. На основі визначеної зони інтересу

та заданих параметрів розробляється алгоритм автоматичної генерації оптимального польотного маршруту. Для дахових сонячних електростанцій цей алгоритм повинен враховувати складну геометрію даху, можливі перепади висот, наявність перешкод (з використанням, за можливості, цифрових моделей місцевості), та оптимізувати траєкторію для мінімізації часу польоту та витрати енергії. Передбачається можливість візуалізації згенерованого маршруту та його ручного коригування оператором для обльоту специфічних зон або перешкод. Принципова блок-схема процесу планування польотної місії, що ілюструє послідовність дій оператора та логіку роботи програмного модуля, представлена на рисунку 2.4.

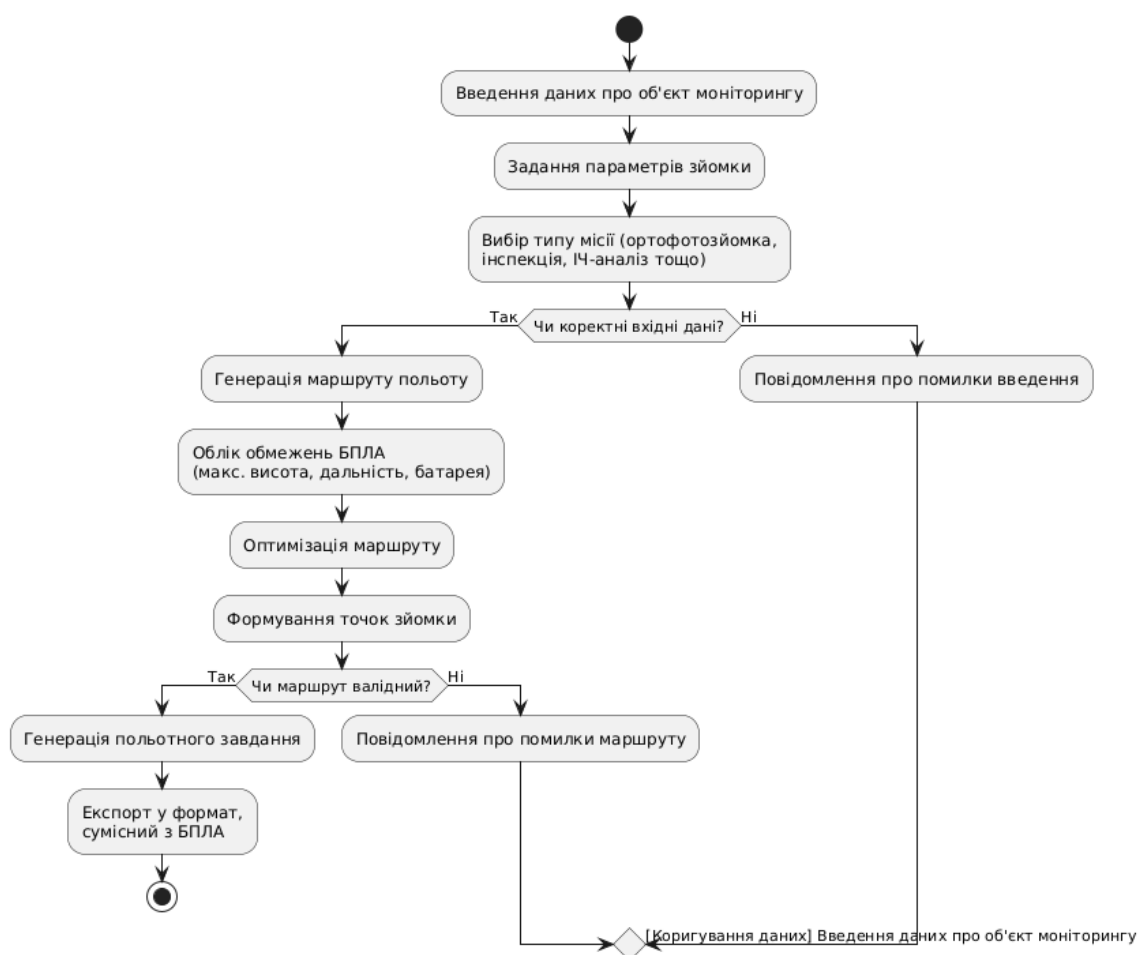


Рисунок 2.5 – Блок-схема процесу планування обльоту

Проектування бортового програмного забезпечення (ПЗ бортового комп'ютера) передбачає реалізацію логіки автономного виконання завантаженого польотного завдання. Це включає точне слідування заданій траєкторії з використанням даних від системи навігації, підтримання заданої висоти та швидкості. Критично важливим є модуль керування активацією візуальної та тепловізійної камер у визначених точках маршруту або з заданою періодичністю. Для кожного зробленого знімка бортове ПЗ повинно фіксувати та зберігати детальну метадані, що включає точний час зйомки, географічні координати, кути орієнтації платформи/камери та інші параметри польоту. Наземне програмне забезпечення має забезпечувати надійний двосторонній канал зв'язку з БПЛА для передачі команд та прийому телеметричних даних у реальному часі.

Другий важливий компонент - це програмне забезпечення для збору, передачі та первинної верифікації даних. Проектується механізм збору метадані під час польоту, включаючи параметри сенсорів та умови зйомки. Після завершення місії, передбачається модуль для швидкого та надійного перенесення великих обсягів зібраних зображень (у радіометричному форматі для ІЧ-даних та RAW/високоякісний JPEG для RGB) та файлів метаданих з бортового накопичувача БПЛА на наземний обчислювальний ресурс. Визначається логічна структура каталогів та стандартизовані формати файлів для збереження сирих даних, що забезпечує їх сумісність з подальшими етапами обробки. Також реалізуються функції автоматичної перевірки цілісності та повноти переданих даних, наприклад, шляхом порівняння кількості файлів, їх розмірів та розрахунку контрольних сум, для виявлення можливих втрат або пошкоджень інформації під час копіювання.

Третій, і найбільш обчислювально ємний, компонент - це програмне забезпечення та алгоритми для попередньої обробки даних моніторингу. Цей етап є критичним для підготовки даних до подальшого інтелектуального аналізу та виявлення дефектів. Проектування цього блоку включає декілька ключових процесів.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По-перше, здійснюється радіометричне калібрування сирих тепловізійних даних. Сирі дані з тепловізійної камери представляють собою значення інтенсивності інфрачервоного випромінювання. Для отримання точних значень температури поверхні сонячних панелей необхідно виконати радіометричне калібрування. Алгоритм цього процесу включає врахування внутрішніх калібрувальних коефіцієнтів камери, компенсацію впливу температури самого сенсора, корекцію на вплив атмосфери (особливо для польотів на значній висоті або в умовах високої вологості), встановлення коефіцієнта випромінювання поверхні сонячних панелей та компенсацію відображеної температури від навколишніх об'єктів. Результатом є тепловізійні зображення, де значення кожного пікселя відповідає температурі поверхні.

По-друге, виконується фотограмметрична обробка зображень. Як для візуальних, так і для теплових даних, застосовуються методи фотограмметрії для створення єдиного, геоприв'язаного представлення всієї обстеженої території у вигляді ортофотоплану або ортомозаїки. Проєктування цього процесу базується на послідовності операцій, реалізованих за допомогою спеціалізованих фотограмметричних бібліотек або програмних пакетів. Процес починається з вирівнювання зображень, що включає пошук та зіставлення спільних ключових точок на перекриваючих знімках та розрахунок параметрів зовнішньої та внутрішньої орієнтації камер. Далі генерується розріджена тривимірна хмара точок. Для підвищення точності моделі використовуються дані від системи RTK/PPK або наземні контрольні точки для точної геоприв'язки моделі до реальної системи координат. Наступним кроком є побудова щільної хмари точок, яка більш детально описує поверхню. Ця щільна хмара точок інтерполюється для створення цифрової моделі поверхні або рельєфу обстежуваного даху та сонячних панелей. Фінальним етапом є орторектифікація та зшивання окремих зображень в єдині безшовні ортофотоплани (для RGB-даних) та теплові ортомозаїки (для ІЧ-даних). Фотограмметрична обробка виконується окремо для наборів візуальних та

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теплових зображень, але з використанням єдиної системи координат для спрощення подальшої інтеграції.

По-третє, критично важливим є забезпечення точного просторового вирівнювання (корекстрації) візуальних та теплових даних на піксельному рівні. Якщо фотограмметрична обробка виконана якісно, отримані ортомозаїки вже будуть географічно вирівняні. Однак, можуть знадобитися додаткові алгоритми тонкого вирівнювання на основі пошуку спільних характерних точок або контурів на обох типах зображень, особливо якщо сенсори не були ідеально синхронізовані або мали різну геометрію зйомки.



Рисунок 2.6 – Блок-схема процесу попередньої обробки даних

2.4 Інтеграція системи та сценарії експлуатації

Проектування ефективної системи моніторингу сонячних панелей на базі БПЛА не обмежується лише розробкою окремих апаратних та програмних

компонентів, але й вимагає ретельного продумування їхньої взаємодії та інтеграції в єдиний, злагоджено функціонуючий комплекс. Цей параграф присвячений детальному опису принципів інтеграції системи, розробці типових робочих потоків (workflows), проєктуванню користувацьких інтерфейсів для забезпечення ефективної взаємодії оператора із системою, а також аналізу потенційних сценаріїв експлуатації та практичного застосування розроблюваної системи для моніторингу дахових сонячних електростанцій. Розробка цих аспектів є критично важливою для забезпечення зручності використання, надійності та досягнення поставлених цілей моніторингу.

Інтеграція різномірних апаратних та програмних компонентів є ключовим завданням на етапі проєктування системи. Ефективна інтеграція передбачає забезпечення їхньої фізичної та логічної сумісності, а також налагодження стабільних та швидкісних каналів обміну даними та керуючими сигналами.

Інтеграція компонентів підсистеми повітряного збору даних є фундаментальною, оскільки якість зібраних даних безпосередньо залежить від коректної інтеграції бортового обладнання. Фізичний монтаж обраних сенсорів (радіометричної тепловізійної камери та візуальної RGB камери), а також системи високоточного позиціонування (GNSS антени та приймача) на безпілотну повітряну платформу вимагає забезпечення їх надійного кріплення, мінімізації впливу вібрацій (з використанням спеціалізованих демпферів або антивібраційних платформ) та оптимального розташування для забезпечення необхідного поля зору та уникнення затінення від елементів конструкції самого БПЛА. Передбачається інтеграція сенсорного комплексу зі стабілізованим трьохосьовим підвісом, що забезпечує не тільки компенсацію кутових рухів БПЛА під час польоту, але й можливість програмного керування напрямком зйомки. Електрична інтеграція передбачає підключення всіх бортових компонентів до системи живлення БПЛА та до бортового обчислювального блоку через відповідні інтерфейси. Програмна інтеграція на борту БПЛА полягає у налаштуванні взаємодії бортового програмного забезпечення з встановленими сенсорами, що включає їх

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ініціалізацію, встановлення параметрів зйомки, програмний запуск/зупинку запису зображень та отримання даних. Надзвичайно важливою є реалізація механізму точної синхронізації моменту спрацьовування затворів камер з даними від системи навігації та позиціонування.

Інтеграція підсистеми повітряного збору даних з Підсистемою наземного керування забезпечує можливість дистанційного керування БПЛА та моніторингу процесу збору даних. Зв'язок між БПЛА та наземною станцією керування реалізується через бездротовий радіоканал. Проєктується вибір або конфігурація відповідних приймально-передавальних модулів, що забезпечують необхідну дальність, пропускну здатність та стійкість зв'язку в умовах міської забудови. Протокол зв'язку має підтримувати стандартизований обмін даними для передачі команд керування, отримання телеметричних даних та, за можливості, потокового відео. Типова схема взаємодії цих підсистем, що ілюструє потоки даних та керуючих сигналів через радіоканал, а також інтерфейси підключення до наземної станції керування, показана на рисунку 2.6.

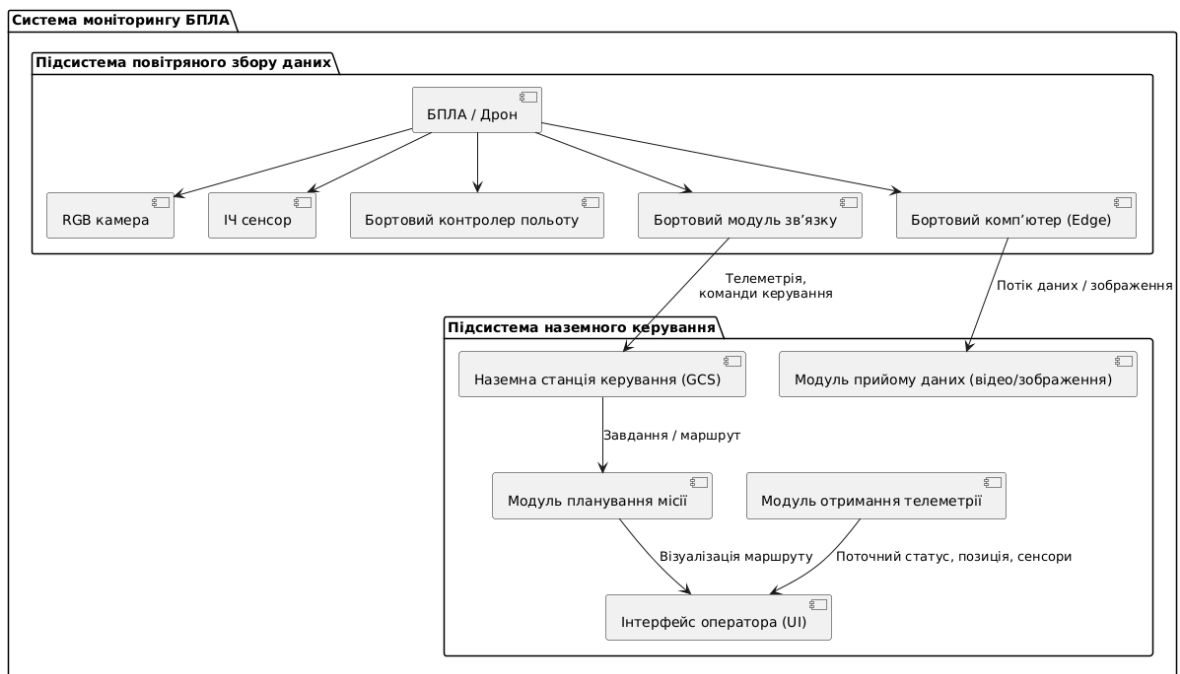


Рисунок 2.7 – Схема інтеграції та взаємодії між підсистемою повітряного збору даних та підсистемою наземного керування

Інтеграція підсистеми наземного керування з підсистемою наземної обробки та аналізу є переважно програмною та пов'язана з передачею даних та керуванням процесами обробки. Після завершення польотної місії зібрані сирі дані передаються з бортового накопичувача БПЛА на наземний обчислювальний ресурс. Програмне забезпечення для завантаження даних забезпечує їх копіювання у визначену структуру каталогів та верифікацію цілісності. Далі, програмні модулі попередньої обробки, аналізу та база даних мають бути інтегровані для послідовної обробки даних, що передбачає визначення форматів обміну даними між модулями та API для їх взаємодії.

Інтеграція підсистеми наземної обробки та аналізу з підсистемою візуалізації та звітності полягає у забезпеченні доступу модулів візуалізації та генерації звітів до інформації з бази даних. Проєктується ефективний інтерфейс запитів до бази даних. Користувацький інтерфейс підсистеми візуалізації інтегрується з програмними модулями, відповідальними за відображення геопросторових даних, таблиць, графіків, а також з модулем генерації звітів.

Для забезпечення ефективного, послідовного та відтворюваного функціонування системи моніторингу проєктується типова послідовність операцій. Етапи операцій описують логічну послідовність дій операторів та автоматизованих операцій системи на кожному етапі від планування інспекції до отримання кінцевих результатів.

У таблиці 2.1 подано ключові компоненти та послідовності. Ця таблиця узагальнює алгоритм дій, починаючи від підготовки до інспекції, через виконання польотної місії та збір даних, до завантаження, попередньої обробки, автоматизованого аналізу, і завершуючи візуалізацією результатів та генерацією діагностичного звіту. Деталізований алгоритм саме обробки та аналізу даних, що охоплює етапи від завантаження сирих даних до отримання фінальних результатів, може бути представлений у вигляді окремої блок-схеми, як на рисунку 2.6.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблювана система моніторингу призначена для практичного застосування у сфері технічного обслуговування та діагностики дахових сонячних електростанцій. Ефективність системи проявляється у різних сценаріях її експлуатації, які можуть бути адаптовані під конкретні потреби власників сонячних електростанцій або сервісних компаній. Ключові сценарії експлуатації системи та очікувані результати від її застосування детально описані в таблиці 2.2. Ці сценарії включають первинну інспекцію нововстановлених сонячних електростанцій, планові періодичні інспекції для виявлення експлуатаційних дефектів, інспекції за вимогою після екстремальних погодних умов, інспекції для оцінки ефективності очищення панелей, а також інспекції перед угодами купівлі-продажу об'єкта та для моніторингу якості ремонтних робіт.

Таблиця 2.5 – типові сценарії експлуатації системи моніторингу

Сценарій експлуатації	Опис та мета застосування системи	Ключові результати та переваги для користувача
Первинна інспекція	Комплексне обстеження нововстановленої сонячної електростанції для виявлення дефектів монтажу, пошкоджень, створення "еталонного" набору даних.	Об'єктивна оцінка якості монтажу, виявлення прихованих дефектів, формування базового звіту, мінімізація гарантійних ризиків.
Планова періодична інспекція	Регулярне обстеження діючої сонячної електростанції для виявлення експлуатаційних дефектів,	Перехід до прогностичного обслуговування, мінімізація простоїв та втрат генерації, оптимізація витрат на ТО та обслуговування

забезпечення, проєктування програмних компонентів та алгоритмів обробки даних, а також визначення принципів інтеграції та сценаріїв експлуатації.

Здійснено проєктування загальної архітектури програмно-технічного комплексу системи. Обрано розподілену, модульну архітектуру, яка забезпечує гнучкість розробки, масштабованість та відмовостійкість. Визначено чотири ключові функціональні підсистеми: Підсистема повітряного збору діагностичних даних, Підсистема наземного керування польотом та завантаження даних, Підсистема наземної обробки та інтелектуального аналізу даних, а також Підсистема візуалізації результатів та звітності. Для кожної підсистеми деталізовано її основні компоненти та описано їхнє функціональне призначення. Встановлено принципи взаємодії між підсистемами, що забезпечують логічну послідовність виконання всіх етапів процесу моніторингу.

Деталізовано проєктування апаратної частини системи. На основі специфіки інспектування дахових СЕС обґрунтовано вибір мультироторної платформи БПЛА з відповідними вимогами до вантажопідйомності, тривалості польоту та навігаційних можливостей. Сформульовано технічні вимоги до комплексу бортових діагностичних сенсорів, включаючи радіометричну тепловізійну та високороздільну візуальну камери, а також до системи високоточного позиціонування GNSS з технологіями RTK/PPK. Визначено вимоги до апаратних компонентів наземного сегменту.

Проведено проєктування програмного забезпечення та алгоритмів обробки даних моніторингу, що охоплюють етапи від керування польотами до підготовки даних для інтелектуального аналізу. Спроектовано принципи роботи модуля планування польотних місій, програмного забезпечення керування БПЛА та синхронізації роботи бортових сенсорів, а також механізми збору, передачі та первинної верифікації даних. Детально розроблено послідовність та ключові алгоритми попередньої обробки даних, що включають радіометричне калібрування

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теплових зображень та фотограмметричну обробку візуальних і теплових даних для створення високоякісних, геоприв'язаних та взаємно вирівняних ортомозаїк.

Розглянуто аспекти інтеграції розроблених апаратних та програмних компонентів у єдиний функціональний комплекс. Описано принципи фізичної та логічної інтеграції компонентів, їх взаємодії через бездротові канали зв'язку та програмні інтерфейси. Деталізовано ключові робочі потоки системи моніторингу, що охоплюють етапи від підготовки до інспекції до генерації фінального діагностичного звіту. Спроектовано структуру та функціональне призначення основних користувацьких інтерфейсів. На завершення, визначено та детально описано типові сценарії експлуатації розроблюваної системи для практичного застосування у моніторингу дахових сонячних електростанцій.

Таким чином, у другому розділі дипломної роботи виконано всебічне проектування системи моніторингу сонячних панелей. Розроблено архітектуру системи, визначено вимоги до апаратних компонентів, спроектовано програмне забезпечення для керування, збору, попередньої обробки та підготовки даних до аналізу. Обґрунтовано принципи інтеграції компонентів та описано робочі потоки, користувацькі інтерфейси і сценарії експлуатації. Результати, отримані на етапі проектування, є комплексною технічною основою та детальною специфікацією для подальшої програмної реалізації та експериментального дослідження розроблюваної системи.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ МОНІТОРІНГУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДАХОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА

3.1 Опис та розробка програмного забезпечення для системи

Програмне забезпечення є ядром будь-якої автоматизованої системи, забезпечуючи координацію апаратних компонентів, управління процесами збору та обробки даних, аналіз інформації та надання результатів користувачеві у зрозумілому форматі. В рамках розробленої системи моніторингу сонячних панелей був реалізований програмний комплекс, архітектура та функціональність якого спрямовані на ефективне виконання поставлених завдань, автоматизацію рутинних операцій та інтеграцію різних джерел даних. Даний розділ детально висвітлює створеного програмного забезпечення.

Програмна реалізація системи моніторингу сонячних панелей охоплює набір компонентів, призначених для управління життєвим циклом моніторингових операцій. Вона починається від планування місій та керування доступними ресурсами (БПЛА, об'єкти інспекції) і завершується збереженням, обробкою зібраних даних та представленням результатів. З огляду на комплексність задачі та необхідність забезпечення доступу до системи для різних користувачів (оператори БПЛА, інженери, менеджери), було прийнято рішення розробити центральну компоненту системи у вигляді веб-додатку.

Для розробки програмного забезпечення був обраний стек технологій, що зарекомендував себе як ефективний для створення надійних, масштабованих та продуктивних веб-застосунків. Основними технологіями, що використовувались, є платформа ASP.NET Core MVC та Entity Framework Core. Вибір ASP.NET Core обумовлений його високою продуктивністю, можливістю крос-платформної розробки та розгортання, підтримкою сучасних архітектурних шаблонів та значною екосистемою розширення. Framework надає все необхідне для побудови повноцінного бек-енду, який ефективно обробляє HTTP-запити та взаємодіє з

					КвРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шаром даних. Entity Framework Core, своєю чергою, значно спростив роботу з базою даних, дозволивши моделювати структуру даних за допомогою C#-класів та виконувати операції з даними за допомогою об'єктно-орієнтованого синтаксису LINQ, тим самим мінімізуючи кількість безпосередньо написаного SQL-коду та знижуючи вірогідність помилок, пов'язаних з ручним управлінням схемою бази даних та запитами. Механізми міграцій EF Core також забезпечили зручний інструмент для управління змінами в структурі бази даних протягом життєвого циклу розробки.

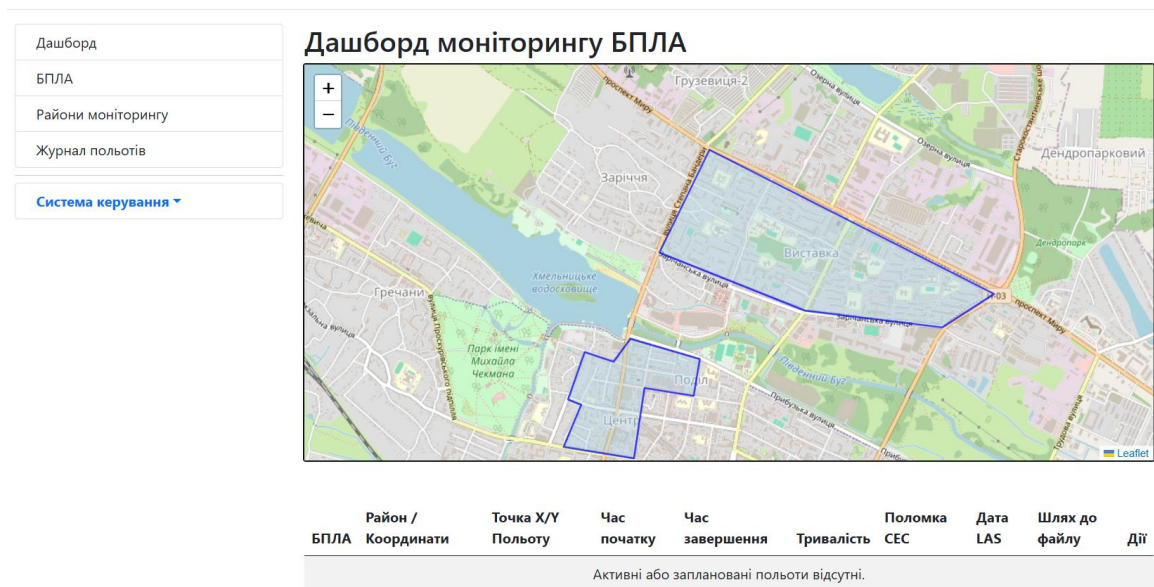


Рисунок 3.1 – головна сторінка веб-додатку

Архітектурно програмне забезпечення системи базується на використанні патерну Model-View-Controller, який забезпечує чітке розділення компонентів за їх функціональною відповідальністю. Такий підхід покращує структурованість коду, його читабельність, підтримку та можливість повторного використання окремих елементів. В межах реалізованої системи патерн MVC застосовується наступним чином:

Моделі виступають у ролі представлення даних застосунку та бізнес-логіки, що працює з цими даними. У системі моніторингу вони реалізовані як набір C#-класів, які ідентичні відповідним таблицям у базі даних та інкапсулюють атрибути

сутностей предметної області. Кожен клас містить властивості, що відповідають полям даних (наприклад, назва, модель, серійний номер БПЛА; назва, координати району; час польоту, використаний БПЛА для польоту), а також можуть містити методи для реалізації базової бізнес-логіки, такої як розрахунок тривалості польоту у класі FlightLog. Крім опису структури даних, класи моделей містять анотації даних для валідації ([Required], [StringLength], [Range]), що дозволяє автоматично перевіряти коректність введених користувачем даних ще на етапі зв'язування моделі в контролерах.

Контролери відповідають за обробку запитів, які надходять від користувача (як правило, через веб-браузер). Вони отримують дані із запиту, звертаються до відповідних моделей для виконання необхідних операцій (наприклад, отримання, збереження, оновлення даних, виклик бізнес-логіки) та обирають необхідний вигляд для формування відповіді, що буде відображена користувачеві. У системі реалізовано кілька контролерів, кожен з яких керує набором функцій, пов'язаних з відповідною сутністю. Контролери містять методи дій, що відповідають за обробку певних HTTP-запитів (наприклад, GET-запит для відображення сторінки зі списком, POST-запит для збереження даних форми) та реалізують основну логіку взаємодії з користувачем та даними.

Вигляд моделі є відповідальним за представлення даних кінцевому користувачу та обробку елементів інтерфейсу користувача. У контексті веб-додатку на ASP.NET Core MVC, Вигляди зазвичай представлені Razor-сторінками, які поєднують HTML-розмітку з C#-кодом для динамічної генерації веб-сторінок на основі даних, переданих контролером. Функціонально вигляди забезпечують відображення списків БПЛА, районів моніторингу, журналів польотів, деталей про кожен об'єкт, а також надання форм для вводу та редагування даних.

Взаємодія з базою даних системи є критично важливою, і її реалізація здійснюється за допомогою класу ApplicationDbContext - основного компонента Entity Framework Core, що виступає як контекст бази даних. Клас ApplicationDbContext інкапсулює логіку зв'язку з конкретною базою даних та

містить набір DbSet для кожної моделі, забезпечуючи програмний інтерфейс для доступу до колекцій сутностей. У методі OnModelCreating цього класу відбувається налаштування відображення об'єктної моделі на реляційну структуру бази даних.

Зокрема, визначаються первинні ключі (за замовчуванням на основі властивості Id), налаштовуються зовнішні ключі та зв'язки між сутностями із зазначенням поведінки при видаленні зв'язаних даних, що забороняє видалення об'єкта (БПЛА чи району), якщо на нього існують посилання в журналах польотів.

Крім того, тут налаштовуються унікальні індекси, наприклад, для серійного номера БПЛА, гарантуючи, що в системі не буде двох дронів з однаковим серійним номером. Для коректного збереження географічних координат, які потребують високої точності, у методі OnModelCreating явно вказано тип стовпця у базі даних як decimal(10, 7). Така детальна конфігурація гарантує цілісність та коректність зберігання всієї необхідної інформації.

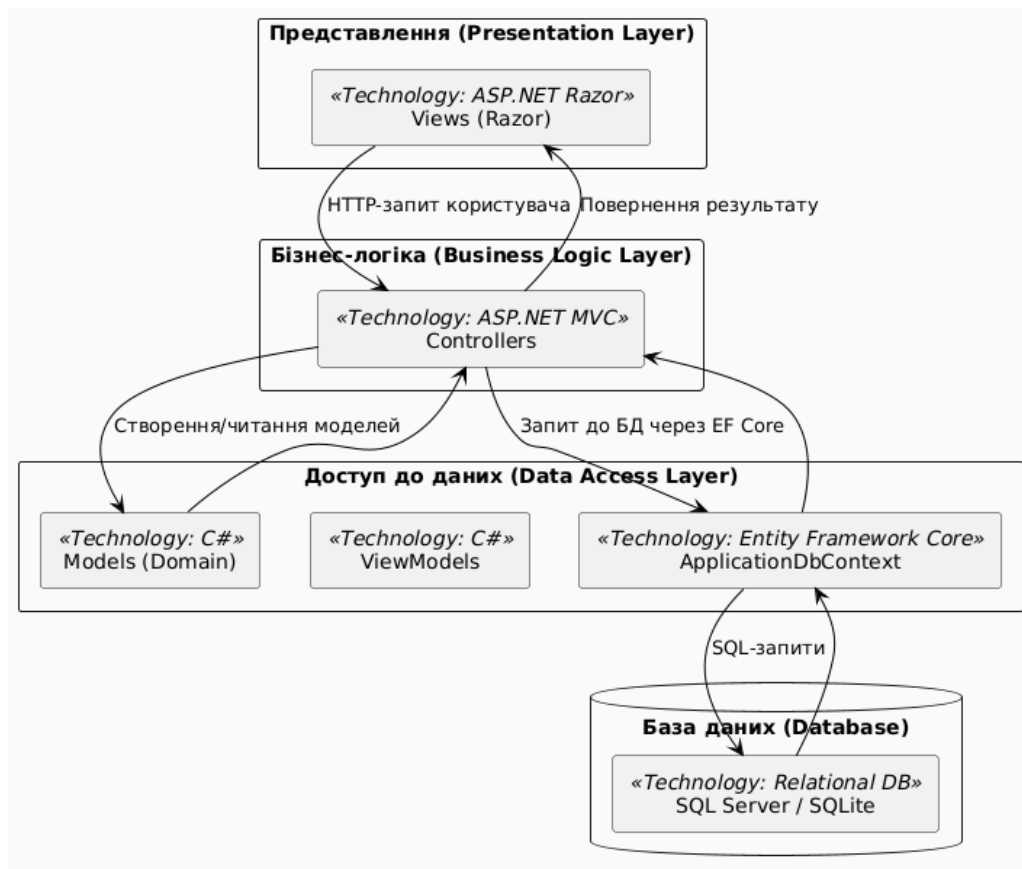


Рисунок 3.2 – Узагальнена архітектура програмного забезпечення

Основна логіка системи зосереджена у відповідних контролерах, які реалізують набір функцій для управління ключовими сутностями системи. Для кращого представлення основні програмні компоненти back-end частини веб-додатку та їх функціональне призначення представлено в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні компоненти програми

Компонент	Використані технології	Основне призначення
FlightLogsController	ASP.NET Core MVC, Entity Framework Core	Управління журналом польотів; перевірка конфліктів часу; інтеграція результатів обльоту
DronesController	ASP.NET Core MVC, Entity Framework Core	Відповідає за керування даними, що стосуються БПЛА, які використовуються в системі
MonitoringAreasController	ASP.NET Core MVC, Entity Framework Core	Контролер призначений для управління інформацією про райони, що підлягають моніторингу - дахові сонячні електростанції або їх окремі ділянки
HomeController	ASP.NET Core MVC, Entity Framework Core	Відповідає за показ інформації на дашборді з результатами на головній сторінці системи

Описаний програмний комплекс у вигляді веб-додатку на базі ASP.NET Core MVC та Entity Framework Core складає фундаментальну частину програмної реалізації системи моніторингу. Він забезпечує стійку структуру для зберігання даних, ефективне управління ресурсами (БПЛА, райони) та процесами (планування польотів), а також готує платформу для інтеграції результатів, отриманих в результаті спеціалізованої обробки даних.

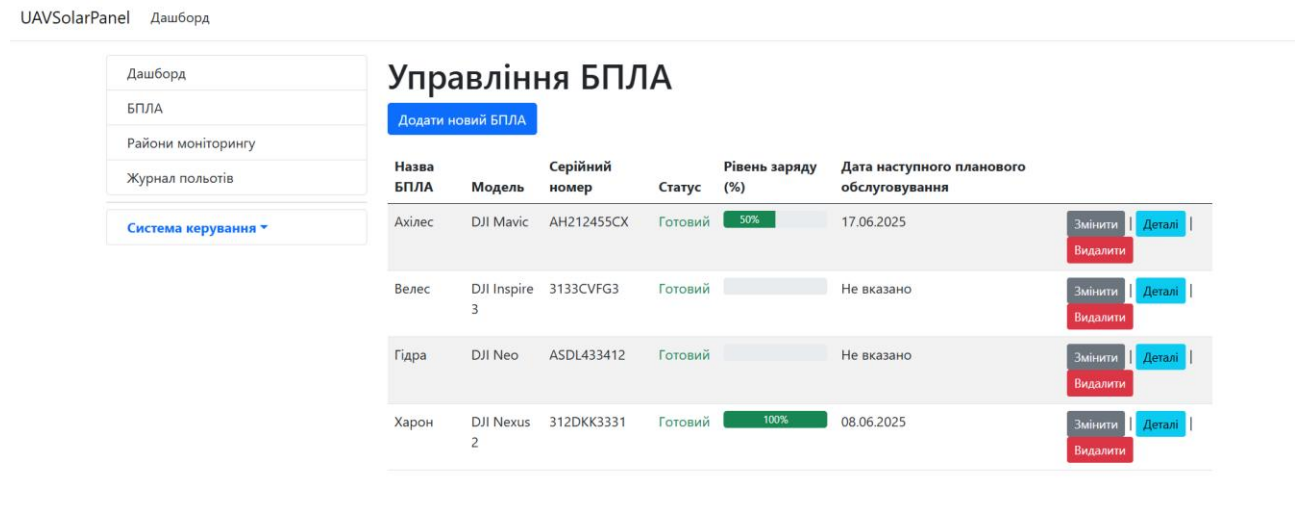


Рисунок 3.3 – Інтерфейс управління БПЛА

Цей компонент, хоч і є ефективною системою управління та обліку, відіграє переважно адміністративну роль. Однак, для вирішення основного завдання моніторингу, критично важливим є інше програмне забезпечення. Саме воно відповідає за безпосередню обробку та детальний аналіз тепловізійних та візуальних зображень, зібраних з БПЛА, що дозволяє точно ідентифікувати дефекти сонячних панелей. Без цього спеціалізованого аналітичного інструменту ефективність була б значно знижена, оскільки управлінська система сама по собі не може виявити несправності.

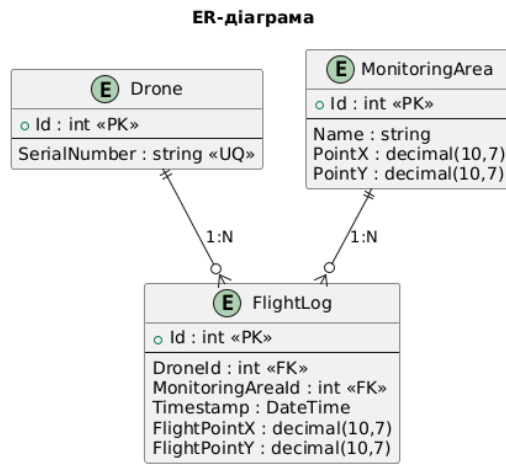


Рисунок 3.4 – ER-діаграма бази даних

Розроблена архітектура та вибір технологій дозволили створити гнучку основу, яка може бути розширена для включення додаткової функціональності, такої як інтеграція з системами управління польотами в реальному часі (якщо це передбачається в майбутньому), більш складний аналіз та візуалізація даних, автоматизоване планування маршрутів на основі координат районів моніторингу тощо. Структура класів моделей, визначена за допомогою Entity Framework Core, є інтуїтивно зрозумілою та відображає реальні сутності, що полегшує як подальшу розробку, так і розуміння роботи системи іншими розробниками.

3.2 Обробка, аналіз та інтерпретація отриманих даних

Процес обробки, аналізу та інтерпретації даних, отриманих під час польотів БПЛА над сонячними електростанціями, становить собою окремий функціональний блок системи моніторингу. Цей етап має на меті трансформацію зібраних сирих даних (тепловізійних та RGB зображень, телеметрії) у структуровану інформацію про стан сонячних панелей та наявність потенційних дефектів. Повноцінний цикл обробки даних передбачає низку послідовних кроків, починаючи від завантаження та попередньої підготовки даних до застосування

спеціалізованих аналітичних алгоритмів для виявлення, класифікації та локалізації аномалій, а також фінального формування звітів.

Хоча розробка повноцінних аналітичних модулів для автоматичної обробки та інтерпретації зображень, що включають реалізацію алгоритмів комп'ютерного зору або методів машинного навчання для точної детекції дефектів, вимагає застосування специфічних інструментів та є окремим науково-ємним завданням, представлена програмна система сфокусована на забезпеченні необхідної інфраструктури для прийому, зберігання, асоціації та відображення результатів такої обробки в централізованій базі даних. Це гарантує, що навіть якщо сама глибока аналітика здійснюється окремими процесами або зовнішніми спеціалізованими інструментами, кінцеві висновки та ідентифіковані дефекти можуть бути інтегровані у загальну систему управління та пов'язані з конкретними моніторинговими місіями та об'єктами інспекції.

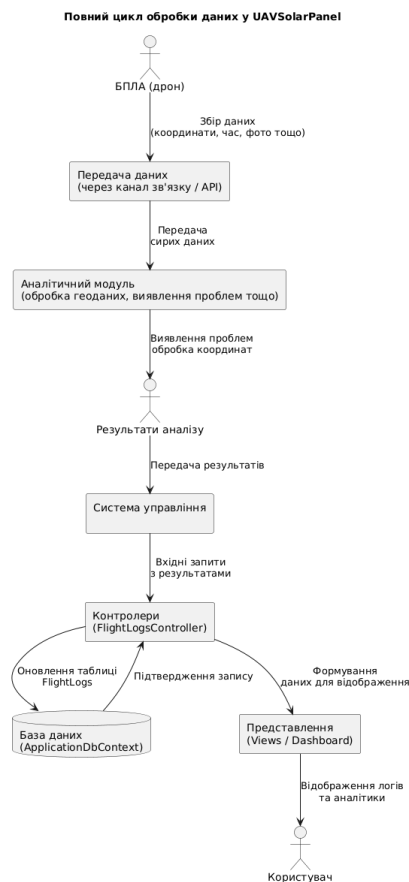


Рисунок 3.5 – Схема процесу обробки даних.

У структурі даних системи управління, що базується на моделі FlightLog, передбачені спеціалізовані поля для фіксації та зберігання результатів, отриманих на етапі аналізу. Це дозволяє асоціювати висновки аналізу безпосередньо з відповідним записом про моніторинговий політ. Таблиця 3.2 деталізує призначення ключових полів класу FlightLog, які використовуються для зберігання інформації про результати польоту.

Таблиця 3.2 – призначення класу FlightLog

Властивість (поле)	Призначення
Id	Унікальний ідентифікатор запису про політ
DroneId	Ідентифікатор БПЛА, що виконав політ
Drone	Навігаційна властивість до об'єкта Drone (БПЛА)
MonitoringAreaId	Ідентифікатор району моніторингу
MonitoringArea	Навігаційна властивість до об'єкта MonitoringArea
StartTime/EndTime	Час початку/завершення польоту
FlightDuration	Розрахована тривалість польоту (EndTime - StartTime)
HasSolarIssues	Показує, чи були виявлені проблеми з сонячною електростанцією
SolarIssuesDetails	Опис виявлених проблем, якщо HasSolarIssues = true
FilePath	Шлях до файлу з даними про політ
FlightPointX	Географічна координата X точки польоту

Кінець таблиці 3.2

FlightPointY	Географічна координата Y точки польоту
LasDate	Дата, пов'язана з даними LAS
FlightOutcome	Результати обльоту, опис у вільній формі

Ці властивості надають можливість фіксувати загальний факт виявлення проблем на сонячних панелях, надавати більш детальний текстовий опис ідентифікованих аномалій або їх характеристик, зберігати посилання на місце розташування вихідних зібраних даних (зображень) або звітів про обробку, а також записувати фінальний підсумок або загальний висновок за результатами інспекції. Наявність цих полів у моделі даних підтверджує готовність системи до інтеграції з аналітичними процесами та структурування їх вихідної інформації.

Для забезпечення ефективною демонстрації функціоналу системи, що стосується управління та відображення результатів, а також для цілей тестування інтерфейсу їх презентації, у компоненті управління журналами польотів було реалізовано допоміжний механізм. Цей допоміжний механізм слугує для імітації заповнення полів, що стосуються результатів проведених обльотів. Для цього він оперує заздалегідь визначеним набором типових висновків, які могли б бути отримані в результаті реальної обробки зібраних даних чи зображень. Ці типові висновки включають різні варіанти станів об'єктів (наприклад, стан панелей) або деталі про виявлені дефекти. Потім цей механізм випадковим чином присвоює обрані висновки записам про вже завершені польоти. Такий підхід дозволяє швидко наповнити систему тестовими даними для ефективною перевірки коректності відображення результатів у користувацькому інтерфейсі та демонстрації відповідного функціоналу системи.

Процес генерації результатів моніторингу

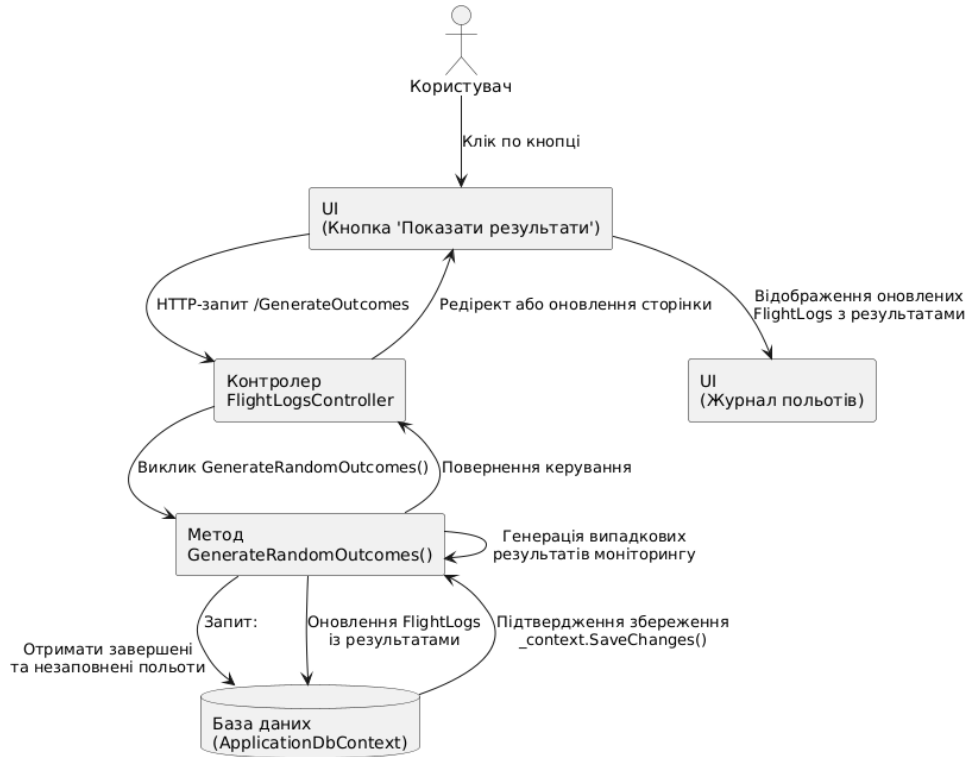


Рисунок 3.6 – схема процесу генерації результатів моніторингу

Така імітація дозволяє візуалізувати, як кінцеві результати аналізу виглядатимуть у системі, та підтвердити коректність структури даних та функціоналу відображення без необхідності підключення реального аналітичного модуля на етапі демонстрації можливостей розробленої управлінської платформи.

Інтерпретація отриманих даних у системі здійснюється через представлення агрегованої інформації користувачеві у веб-інтерфейсі. Ключовим елементом для цього є сторінка "Журнал моніторингу СЕС", представлений на рисунку 3.7.

На цій сторінці відображається перелік усіх зареєстрованих польотів із зазначенням ключових метаданих та, що найважливіше для цього підрозділу, фінальних результатів моніторингу, отриманих після обробки зібраних даних (або імітованих). Користувач може швидко оцінити загальний стан інспектованої ділянки за інформацією, представленою у відповідних стовпцях таблиці. Таким чином, розроблене програмне забезпечення надає інтерфейс для візуальної

інтерпретації стандартизованих висновків аналізу, дозволяючи користувачеві отримати уявлення про стан сонячної електростанції та прийняти подальші дії.

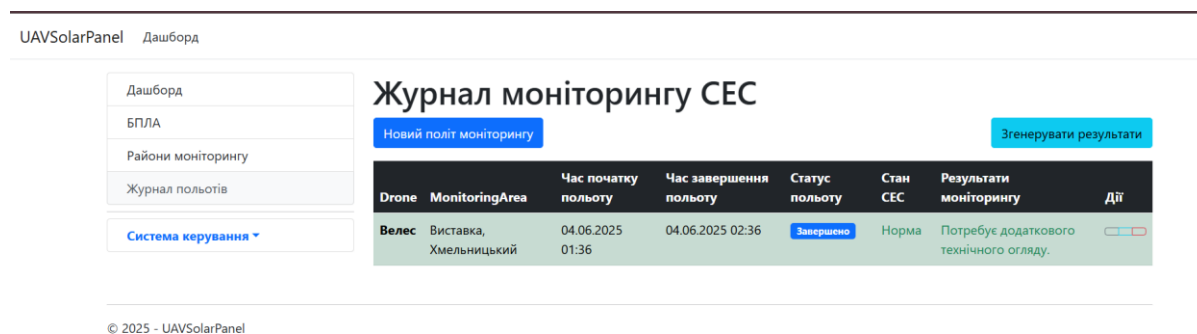


Рисунок 3.7 – журнал моніторингу сонячних електростанцій

Таким чином, хоча безпосередня реалізація складних алгоритмів обробки зображень є завданням окремого функціонального компонента, розроблене програмне забезпечення системи моніторингу створює необхідну цифрову інфраструктуру для ефективного управління результатами аналізу. Воно забезпечує стандартизовану структуру для зберігання даних про виявлені дефекти та загальні підсумки інспекції, асоціює ці результати з відповідними польотами та об'єктами моніторингу, а також надає зручний інтерфейс для візуалізації та інтерпретації кінцевих висновків користувачем, що є завершальним кроком у ланцюгу обробки моніторингової інформації.

Цей підхід дозволяє інтегрувати в систему результати роботи як повністю автоматизованих аналітичних інструментів, так і даних, отриманих шляхом ручної експертної дешифровки, забезпечуючи централізоване зберігання та доступ до всієї моніторингової інформації.

Програмна реалізація враховує етап обробки та аналізу даних шляхом створення структури для зберігання їхніх результатів та інтеграції цих результатів у систему управління польотами.

3.3 Тестування працездатності системи

Важливим і невіддільним етапом життєвого циклу розробки програмного забезпечення є його тестування та валідація. Цей процес дозволяє встановити ступінь відповідності розробленого продукту вихідним вимогам та специфікаціям, забезпечити його надійність, стабільність та коректність виконання функцій. Тестування дає можливість виявити помилки та недоліки реалізації до моменту впровадження системи в експлуатацію.

В контексті розробленої системи моніторингу сонячних панелей було проведено цілеспрямоване тестування тієї частини програмного комплексу, яка була реалізована, а саме веб-додатку для управління ресурсами (БПЛА, районами моніторингу) та планування й обліку польотів. Враховуючи функціональне призначення цього компонента, основним об'єктом перевірки стала коректність роботи інтерфейсів користувача, реалізація бізнес-логіки управління даними та забезпечення цілісності даних у базі. Тестування аспектів, пов'язаних безпосередньо з обробкою та аналізом зображень для детекції дефектів, не проводилось на даному етапі, оскільки реалізація відповідного аналітичного модуля виходить за рамки поточного дослідження та потребує окремого етапу розробки і спеціалізованої методології тестування.

Основною методологією тестування, що застосовувалася до веб-додатку, ґрунтувалася на принципах функціонального тестування. Головною метою цього підходу було підтвердження того, що кожна функція системи управління даними бездоганно працює відповідно до проєкту та бізнес-вимог. Тестування охопило перевірку повного спектру операцій - таких як створення, читання, оновлення та видалення - для кожної ключової сутності в системі. Це забезпечило впевненість у коректності виконання типових сценаріїв використання додатку та цілісності даних.

Схема тестування веб-додатку системи моніторингу сонячних панелей



Рисунок 3.8 – схема тестування веб-додатку системи моніторингу

Для сутності БПЛА було протестовано створення нового запису про БПЛА із заповненням усіх обов'язкових полів (назва, модель, серійний номер). Перевірялася коректність збереження даних та їх поява у загальному списку. Перегляд детальної інформації про окремий БПЛА після вибору зі списку, для підтвердження відповідності відображених даних збережених раніше. Редагування наявного запису про БПЛА (наприклад, зміна статусу, рівня заряду, дати наступного обслуговування). Перевірялася можливість успішного збереження змін та їх

коректне відображення. Видалення запису про БПЛА, яке перевіряло, що запис зникає зі списку, і, якщо можливо, підтверджувалася його відсутність у базі даних.

Аналогічний набір CRUD-операцій був протестований і для сутності MonitoringArea, включаючи перевірку можливості створення запису з вказанням назви та опису, а також коректність відображення (хоча і у вигляді розрахованих координат центру) інформації про географічні межі об'єкта. Була здійснена перевірка форм додавання та редагування району, зокрема, візуальна оцінка коректності інтеграції компонента карти для визначення полігону.

Найбільш детального функціонального тестування вимагала сутність FlightLog, оскільки саме з нею пов'язана основна бізнес-логіка планування. Тут перевірялася можливість створення записів про заплановані польоти із вибором БПЛА, району та вказанням часу. Важливим етапом стало тестування логіки запобігання часовим конфліктам для одного БПЛА. Перевірка виконувалась шляхом моделювання ситуацій, коли час початку нового польоту раніше часу завершення існуючого, час завершення пізніше часу початку існуючого, або новий інтервал повністю перекриває існуючий. У кожному випадку очікувалося, що система видасть відповідне повідомлення про помилку валідації або конфлікт планування, і збереження некоректного запису не відбудеться. Підтверджено, що система успішно ідентифікує такі колізії, забезпечуючи цілісність даних планування ресурсів.

Окрім функціональних перевірок, проводилось тестування валідації вхідних даних. Це включало перевірку спрацьовування валідаційних правил (анотацій даних) на веб-формах, що відповідають за введення інформації про БПЛА, райони та польоти. Перевірялася реакція системи на спроби залишити обов'язкові поля порожніми, ввести некоректні формати даних (наприклад, текст замість числа рівня заряду), або значення за межами допустимого діапазону. Тестування показало, що система ефективно здійснює первинну валідацію на рівні інтерфейсу та бек-енду, повідомляючи користувача про необхідність коригування даних. Типовий приклад

HasSolarIssues, SolarIssuesDetails, FilePath, FlightOutcome у записах FlightLog можуть бути заповнені та збережені. Була проведена перевірка працездатності функції генерації результатів, реалізованої в FlightLogsController, яка заповнює ці поля даними. Перевірка полягала у виклику цієї функції та візуальному підтвердженні того, що дані про результати з'являються у відповідних записах журналу польотів, що відображається на сторінці "Журнал моніторингу СЕС" (як було показано на рисунку 3.6). Цей тест підтвердив, що структура даних та програмний інтерфейс для інтеграції результатів аналізу функціонують коректно.

Враховуючи стадію реалізації, основний обсяг тестування був виконаний вручну розробником, шляхом прямої взаємодії з веб-інтерфейсом через браузер та використання стандартних інструментів розробки для налагодження та перевірки стану даних у базі.

Результати проведеного тестування підтвердили коректність реалізації основних функціональних можливостей веб-додатку системи моніторингу. Всі ключові операції управління даними виконуються без помилок. Механізми валідації та перевірки бізнес-правил функціонують згідно з логікою проєкту. Реалізована структура для зберігання та відображення результатів моніторингу готова до прийому даних від аналітичного модуля. Це дозволяє вважати розроблений компонент управління системою працездатним та відповідним вимогам, що були поставлені для цього етапу проєкту.

Валідація системи в цілому, яка полягала б у підтвердженні здатності БПЛА з інтегрованим програмним забезпеченням ефективно виявляти дефекти сонячних панелей у реальних умовах експлуатації та надавати точні діагностичні висновки, є завданням майбутніх етапів розробки та тестування. Для цього потрібна інтеграція з функціональним аналітичним модулем та проведення натурних випробувань зі збором та порівняльним аналізом даних з іншими методами інспекції (наприклад, ручним оглядом, наземною термографією). Проте, вже реалізований фундамент управління даними та процесами забезпечує необхідну основу для інтеграції з більш складними компонентами системи.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Висновки до третього розділу

На цьому етапі відбулося практичне втілення архітектурних та функціональних рішень, запропонованих у попередніх розділах. Ключовим результатом стала розробка програмного забезпечення, що забезпечує управління основними процесами та даними системи.

Програмна реалізація центральної компоненти системи управління була виконана у вигляді веб-додатку з використанням сучасного стеку технологій, а саме ASP.NET Core MVC для організації серверної логіки та веб-інтерфейсу, та Entity Framework Core для ефективної взаємодії з базою даних. Застосування архітектурного патерну Model-View-Controller дозволило досягти чіткого структурного поділу програмних компонентів, підвищивши таким чином їх модульність, керованість та можливість подальшого розширення. Вибір технологій обґрунтовано їх високою продуктивністю, надійністю та широкими можливостями для побудови масштабованих корпоративних застосунків.

В рамках розробленого програмного комплексу було імплементовано ключові функціональні блоки. Реалізовано модулі для ефективного управління даними про парк безпілотних літальних апаратів, що використовуються для моніторингу, а також ведення реєстру районів (територій) сонячних електростанцій, що підлягають інспекції, із можливістю фіксації та обробки їхніх географічних координат. Особливу увагу було приділено розробці підсистеми управління журналами польотів, яка забезпечує можливість планування моніторингових місій, обліку виконаних завдань та асоціації даних з конкретними БПЛА та об'єктами. Імплементована логіка автоматичної перевірки наявності часових конфліктів для обраного БПЛА при плануванні польотів гарантує відсутність колізій у використанні ресурсів та підтверджує коректність реалізації бізнес-правил.

Щодо етапу обробки, аналізу та інтерпретації отриманих під час моніторингу даних (тепловізійних та візуальних зображень), розроблена програмна частина

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи слугує централізованою платформою для управління результатами цього аналізу. У структурі даних моделі "Журнал польоту" передбачено спеціалізовані поля, що дозволяють зберігати стандартизовані висновки аналітичних процесів (факт виявлення проблем, їх опис, загальний підсумок, посилання на вихідні файли чи детальні звіти), а веб-інтерфейс забезпечує їх візуалізацію та доступ для користувача. Такий підхід гарантує інтеграцію кінцевих результатів моніторингу в єдину систему обліку та планування, забезпечуючи основу для подальшої інтерпретації та прийняття рішень.

Проведене тестування реалізованої частини програмного забезпечення підтвердило її працездатність. Шляхом функціонального тестування було перевірено коректність виконання всіх операцій з управління даними, а тестування валідації підтвердило надійність обробки вхідних даних та спрацьовування вбудованих перевірок цілісності. Імплементована бізнес-логіка запобігання конфліктам часу польотів функціонує відповідно до специфікації, що було підтверджено за допомогою відповідних тестових сценаріїв.

Таким чином, програмну реалізацію ключового компонента системи моніторингу - веб-додатку для управління ресурсами та процесами, що забезпечує основу для інтеграції результатів аналізу - було успішно здійснено. Розроблений програмний комплекс є функціональним, відповідає поставленим вимогам до управління даними та створює надійну програмну основу для подальшого розвитку всієї системи моніторингу.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було розроблено та досліджено концептуальні основи та програмні компоненти системи моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням безпілотних літальних апаратів. Сформульовано ключові проблеми існуючих підходів, спроектовано архітектуру системи та реалізовано програмне забезпечення для управління основними процесами та даними моніторингу.

У першому розділі проведено аналіз предметної області моніторингу сонячних електростанцій, виявлено переваги та недоліки традиційних методів діагностики, а також детально розглянуто сучасні підходи до інспектування ФЕ систем з використанням БПЛА. Проаналізовано типові дефекти сонячних панелей та фактори, що впливають на ефективність їхнього моніторингу. На основі аналізу існуючих рішень та їхніх обмежень, особливо у контексті дахових електростанцій, сформульовано постановку задачі дослідження, що визначила за мету визначення умов та особливостей застосування обладнання БПЛА та оцінку механізмів обробки інформації у кіберфізичній системі моніторингу для ефективного виявлення об'єктів.

У другому розділі проведено комплексне проектування системи моніторингу сонячних панелей. Розроблено модульну розподілену архітектуру системи, що включає підсистеми повітряного збору даних, наземного керування та завантаження даних, наземної обробки та інтелектуального аналізу даних, а також візуалізації результатів та звітності. Визначено функціональне призначення компонентів кожної підсистеми та принципи їхньої взаємодії. Деталізовано вимоги до апаратного забезпечення, включаючи вибір типу БПЛА, бортових сенсорів (тепловізійної та візуальної камер), системи високоточного позиціонування та наземних обчислювальних ресурсів. Розроблено принципи функціонування програмного забезпечення для планування польотних місій, керування БПЛА, збору даних та їх попередньої обробки, включаючи радіометричне калібрування та

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фотограмметрію. Розглянуто аспекти інтеграції компонентів системи, робочі потоки, користувацькі інтерфейси та типові сценарії експлуатації.

У третьому розділі представлено програмну реалізацію ключового компонента системи моніторингу - веб-додатку для управління процесами та даними, розробленого на платформі ASP.NET Core MVC з використанням Entity Framework Core. Детально описано вибір та обґрунтування конфігурації типів апаратних компонентів, на які орієнтована система. Розглянуто розробку програмного забезпечення, включаючи реалізацію доменних моделей, контролерів та представлень, що забезпечують управління парком БПЛА, районами моніторингу, планування та облік польотів, а також обробку геопросторових даних. Описано процес обробки, аналізу та інтерпретації отриманих даних в рамках поточного функціоналу системи, що включає механізми для фіксації та візуалізації результатів діагностики, отриманих (на даному етапі симульовано) після польотів. Проведено функціональне тестування розробленого веб-додатку, яке підтвердило працездатність основного функціоналу управління даними та реалізованої бізнес-логіки, включаючи валідацію вхідних даних та запобігання конфліктам планування.

					КвРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Choi K., Suh J. Fault detection and power loss assessment for rooftop photovoltaics installed in a university campus, by use of UAV-based infrared thermography. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 11, art. 4513.
2. Meribout M. Sensor systems for solar plant monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. T. 72. P. 1-16.
3. Bemposta Rosende S., Sanchez-Soriano J., Gómez Muñoz C., Fernández Andrés J. Remote management architecture of UAV fleets for maintenance, surveillance, and security tasks in solar power plants. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 21, art. 5712.
4. Libra M., Daneček M., Lešetický J., Poulek V., Sedláček J., Beránek V. Monitoring of defects of a photovoltaic power plant using a drone. *Energies*. 2021. Vol. 12, no. 5, art. 795.
5. Hwang Y.S., Schluter S., Lee J.J., Um J.S. Evaluating the Correlation between Thermal Signatures of UAV Video Stream versus Photomosaic for Urban Rooftop Solar Panels. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 23, art. 4770.
6. Al-Gawda M., Lau C., Lai N. Autonomous Uav Inspection System For Preventive Maintenance Of Solar Farms. *J. Eng. Sci. Technol*. 2022. P. 132-156.
7. Akay S., Özcan O., Özcan O., Yetemen. Efficiency analysis of solar farms by UAV-based thermal monitoring. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2024. T. 53. P. 101-168.
8. Idris N., Ahmad M., Kahlid M., Kamal A., Hamdan H., Ahmad M. UAV Thermal Imaging for Solar Panel Assessment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. P. 012063.
9. Hwang Y.S., Schlüter S., Park S.I., Um J.S. Comparative evaluation of mapping accuracy between UAV video versus photo mosaic for the scattered urban photovoltaic panel. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 14, art. 2745.
10. Milidonis K., Eliades A., Grigoriev V., Blanco M. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the planning, operation and maintenance of concentrating solar thermal systems: A review. *Solar Energy*. 2023. T. 254. P. 182-194.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Winkel P., Smretschnig J., Wilbert S., Röger M., Sutter F. та ін. Electrothermal Modeling of Photovoltaic Modules for the Detection of Hot-Spots Caused by Soiling. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 19, art. 4878.

12. Naeem U., Chadda K., Vahaji S., Ahmad J., Li X., Asadi E. Aerial Imaging-Based Soiling Detection System for Solar Photovoltaic Panel Cleanliness Inspection. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2025. Vol. 25, no. 3, art. 738.

13. Narvios W., Nguyen Y. IoT based detection, monitoring and automatic cleaning system for soiling of PV solar panel. *AIP Conference Proceedings*. 2021.

14. Ates A., Singh H. Rooftop solar Photovoltaic (PV) plant-One year measured performance and simulations. *Journal of King Saud University-Science*. 2021. T. 33, № 3. P. 101- 361.

15. Fakhraian E., Alier M., Valls Dalmau F., Nameni A., Casan Guerrero M. The urban rooftop photovoltaic potential determination. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 13, art. 7447.

16. Huang X., Hayashi K., Matsumoto T., Tao L., Huang Y., Tomino Y. Estimation of rooftop solar power potential by comparing solar radiation data and remote sensing data - a case study in Aichi, Japan. *Remote sensing*. 2022. Vol. 14, no. 7, art. 1742.

17. Joshua S., Park S., Kwon K. Solar Panel Fault Detection: Applying Convolutional Neural Network for Advanced Fault Detection in Solar-Hydrogen System at University. *2024 IEEE 24th International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion (QRS-C)*. 2024. P. 289-298.

18. Pathak S., Patil S. Evaluation of effect of pre-processing techniques in solar panel fault detection. *IEEE Access*. 2023. T. 11. P. 728-760.

19. Dhanraj J., Mostafaeipour A., Velmurugan K., Techato K., Chaurasiya P. та ін. An effective evaluation on fault detection in solar panels. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 22, art. 7770.

20. Melo G., Torres I., Araújo ., Brito D., Barboza E. A low-cost IoT system for real-time monitoring of climatic variables and photovoltaic generation for smart grid application. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 9, art. 3293.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. He W., Baig M., Iqbal M. An Open-Source Supervisory Control and Data Acquisition Architecture for Photovoltaic System Monitoring Using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 10, art. 2295.

22. Ramachandran A. V., Jeevalakshmi S., Muthubalan V. Optimizing the Spectral Sharing in a Vertical, Bifacial AgriVoltaics Farm. *Journal of Physics D Applied Physics*. 2021. Vol. 54. DOI: 10.1088/1361-6463/abfbae.

23. Ansari S., Ayob A., Lipu M., Saad M., Hussain A. A review of monitoring technologies for solar PV systems using data processing modules and transmission protocols: Progress, challenges and prospects. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 15, art. 8120.

24. Umar S., Qureshi M., Nawaz M. Thermal imaging and AI in solar panel defect identification. *International Journal of Advanced Engineering Technologies and Innovations*. 2024. T. 1, № 3. P. 73-95.

25. Sriram A., Sudhakar T. Photovoltaic Cell Panels Soiling Inspection Using Principal Component Thermal Image Processing. *Computer Systems Science & Engineering*. 2023. T. 46, № 1.

26. Olayiwola O., Camara F. Challenges and opportunities for autonomous UAV inspection in solar photovoltaics. *International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering*. 2024. P. 100-103.

27. Tanda G., Migliazzi M. Infrared thermography monitoring of solar photovoltaic systems: A comparison between UAV and aircraft remote sensing platforms. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024. T. 48. P. 102-379.

28. Goudelis G., Lazaridis P., Dhimish M. A review of models for photovoltaic crack and hotspot prediction. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 12, art. 4303.

29. Cardinale-Villalobos L., Jimenez-Delgado E., García-Ramírez Y., Araya-Solano L., Solís-García L., Méndez-Porras A., Alfaro-Velasco J. IoT system based on artificial intelligence for hot spot detection in photovoltaic modules for a wide range of irradiances. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 15, art. 6749.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

30. Winston D., Murugan M., Elavarasan R., Pugazhendhi R., Singh O. та ін. Solar PV's micro crack and hotspots detection technique using NN and SVM. *IEEE access*. 2021. T. 9. C. 127-169.

31. Munawar H., Ullah F., Heravi A., Thaheem M., Maqsoom A. Inspecting buildings using drones and computer vision: A machine learning approach to detect cracks and damages. *Drones*. 2021. Vol. 6, no. 1, art. 5.

32. Li J., Jiang S., Song L., Peng P., Mu F. та ін. Automated optical inspection of FAST's reflector surface using drones and computer vision. *Light: Advanced Manufacturing*. 2023. Vol. 4, no. 1. P. 3-13.

33. Ejaz N., Choudhury S. Computer vision in drone imagery for infrastructure management. *Automation in Construction*. 2024. T. 163. P. 105418.

34. Shakya S. A self monitoring and analyzing system for solar power station using IoT and data mining algorithms. *Journal of Soft Computing Paradigm*. 2021. T. 3, № 2. C. 96-109.

35. Amaral T., Pires V., Pires A. Fault detection in PV tracking systems using an image processing algorithm based on PCA. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 21, art. 7278.

36. Kirubakaran V., Preethi D., Arunachalam U., Rao Y., Gatasheh M. та ін. Infrared thermal images of solar PV panels for fault identification using image processing technique. *International Journal of Photoenergy*. 2022. № 1. P. 1-12

37. Pingulkar C. Integrating Drone Technology For Enhanced Solar Site Management. 2024. URL: <https://ssrn.com/abstract=5074745> (дата звернення: 15.05.2024).

38. Olayiwola O., Elsdon M., Dhimish M. Robotics, Artificial Intelligence, and Drones in Solar Photovoltaic Energy Applications-Safe Autonomy Perspective. *Safety*. 2024. Vol. 10, no. 1, art. 32.

39. Wang Y., Kumar L., Raja V., AL-bonsrulah H., Kulandaiyappan N. та ін. Design and innovative integrated engineering approaches based investigation of hybrid renewable energized drone for long endurance applications. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 23, art. 16173.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

40. Thanh T., Minh P., Duong Trung K., Anh T. Study on performance of rooftop solar power generation combined with battery storage at office building in northeast region, Vietnam. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 19, art. 11093.

41. Zublie M., Hasanuzzaman M., Rahim N. Modeling, energy performance and economic analysis of rooftop solar photovoltaic system for net energy metering scheme in Malaysia. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 2, art. 723.

42. Jallal M. A., El Yassini A., Samira C., Zeroual A. Towards Smart Monitoring Systems: Fault Detection and Diagnosis-Based Artificial Intelligence Algorithms in Solar PV Power Plants. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2022. Vol. 14, № 5. P. 12-16.

					КВРКІ 210241.21.02.59 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 0.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 9%

ID: 244090 Title: БКР Система моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА Added in a DB: 2025-06-08 Authors: Артем КУЦЬКИЙ Heads: Богдан САВЕНКО Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	90668	576	1064 (1%)	16 (3%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Артем КУЦЬКИЙ

Співавтор:

Назва: Куцький_Система моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 7%

Коефіцієнт подібності 2: 3.8%

Мікропробіли: 20

Заміна букв: 1

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-08 07:11:06.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-06-08

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Артем КУЦЬКИЙ

Тема: Система моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 73

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка системи моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз предметної області моніторингу сонячних електростанцій, виявлено проблеми традиційних методів діагностики та досліджено сучасні підходи із застосуванням БПЛА. На основі аналізу існуючих рішень та їх обмежень, особливо для дахових СЕС, сформульовано постановку задачі дослідження, спрямовану на вдосконалення системи моніторингу. У другому розділі кваліфікаційної роботи здійснено комплексне проектування системи моніторингу сонячних панелей дахових СЕС з використанням БПЛА. Розроблено модульну архітектуру системи з визначенням ключових підсистем. Сформульовано технічні вимоги та обґрунтовано вибір апаратного забезпечення. Детально спроектовано програмне забезпечення та алгоритми обробки даних, охоплюючи планування місій, збір, попередню обробку даних. Описано принципи інтеграції, робочі потоки, інтерфейси та сценарії експлуатації. У третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано програмну реалізацію веб-додатку системи моніторингу на платформі ASP.NET Core MVC з використанням Entity Framework Core. Описано вибір та конфігурацію типів апаратних компонентів. Деталізовано розробку програмного

забезпечення для управління БПЛА, районами моніторингу, журналами польотів та обробки даних. Проведено функціональне тестування розробленого веб-додатку, що підтвердило його працездатність.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи:

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи:

Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно (4.80/A)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Траворська Наталія Іванівна, доцент кафедри ППЗ
к. ед. наук

“ ” _____ 2025 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри КПС
д-р. філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ

Артема КУЦЬКОГО

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-21-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Strike-Plagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

9 червня 2025 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Система моніторингу сонячних панелей дахових електростанцій з використанням БПЛА

Автор: Артем КУЦЬКИЙ

Спеціальність: 123– Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Богдан САВЕНКО, д.ф.

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) Запозичені елементи, що містяться у розділах, присвячених аналізу існуючих аналогів та прототипів, не відображають безпосередньо результатів авторського дослідження і не входять до його основної частини.
- 2) Усі випадки запозичень є фрагментарними або супроводжуються належним чином оформленими посиланнями.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 6.97% і адресується до 39 першоджерел; та системою Anti-Plagiarism складає 0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС



Богдан САВЕНКО

Андрій Нічепорук

Ольга ПАВЛОВА