

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту сонячних панелей з
GPS-навігацією
Назва теми

КВРКІ 022023.22.02.01 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 III курсу, група K12C-22-2


Підпис

Михайло МАНАЧИН
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

Олег САВЕНКО
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

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


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

«4» 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**

Михайлу МАНАЧИНУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система адаптивного застосування моніторингових елементів розвідувального БПЛА

Керівник проекту (роботи) Олег САВЕНКО, д.т.н., професор, професор кафедри

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 01.06.2025 р.

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

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

Кіберфізична система з одним бпла для обльоту сонячних панелей з gps-навігацією:
постановка задач і її удосконалення

Проектування кіберфізичної системи обльоту сонячних панелей за допомогою бпла з gps-
навігацією

Програмно-апаратий прототип кіберфізичної системи обльоту сонячних панелей за
допомогою бпла з gps-навігацією

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

Принципово-електрична схема дрона

Структурна схема моніторингу сонячних панелей

Алгоритм роботи польоту БПЛА

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

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

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 напрямку 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	01.02.2025	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проектування системи адаптивного застосування моніторингових елементів розвідувального БПЛА	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – проектування системи адаптивного застосування моніторингових елементів розвідувального БПЛА	29.04.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2025	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Підпис

Михайло МАНАЧИН
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Олег САВЕНКО
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS-навігацією».

Автор роботи: Маначин Михайло Валерійович

Керівник роботи: Савенко Олег Станіславович

Пояснювальна записка: 61 с., 6 рис., 4 дод., 59 джерел

Графічна частина: 3 креслення

Метою даного дослідження є розробка та впровадження кіберфізичної системи з одним БПЛА для обльоту сонячних панелей із використанням GPS-навігації, що поєднує апаратні компоненти (квадрокоптер, автопілот Pixhawk, тепловізор, RGB-камера, GPS-модуль, телеметрія) та програмну частину (ArduPilot, Mission Planner, Python-алгоритми, база даних PostGIS) для автономного моніторингу технічного стану панелей.

Об'єктом дослідження є апаратно-програмна система моніторингу сонячних панелей на основі безпілотного літального апарата.

Предметом дослідження є методи збору, навігації, геоприв'язки та обробки зображень у процесі інспекції сонячних панелей за допомогою БПЛА.

Під час дослідження застосовано метод системного аналізу для оцінки існуючих рішень, методи схемотехнічного та конструктивного проектування для розробки апаратної частини системи, а також експериментальні випробування для перевірки працездатності прототипу в реальних умовах.






Підпис студента

30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА З ОДНИМ БПЛА ДЛЯ ОБЛЬОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З GPS-НАВІГАЦІЄЮ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ І ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ.....	5
1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей кіберфізичної системи обльоту сонячних панелей БПЛА з GPS-навігацією	5
1.2 Огляд відомих рішень та засобів для відстеження якості повітря із збереженням даних у хмарі.....	11
1.3 Висновки. Постановка задачі.....	15
2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ОБЛЬОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА З GPS-НАВІГАЦІЄЮ	17
2.1 Визначення апаратних компонентів, вибір БПЛА, GPS-модуля, сенсорів для зйомки панелей	17
2.2 Опис взаємодії між БПЛА, наземною станцією і базою геоданих панелей. Алгоритм взаємодії системи	27
2.3 Висновки до другого розділу	36
3 ПРОГРАМНО-АПАРАТИЙ ПРОТОТИП КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ОБЛЬОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА З GPS-НАВІГАЦІЄЮ.....	37
3.1 Реалізація модулів польоту і збору геоданих БПЛА.....	37
3.2 Принципова електрична схема та алгоритм роботи дрона.....	49
3.3. Висновки до третього розділу.....	57
ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	60

КвРКІ 022023.22.02.01 ПЗ				
Зм.	Арк.	Надокум.	Підпис	Дата
Виконав		Михайло МАНА		
Перевід.		Олег САВЕНКО-		
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		
Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS-навігацією			Літера	Аркуш
			у	2
			Аркушів	
			72	
ХНУ КІ2С-22-2				

ДОДАТОК А.....	65
ДОДАТОК Б.....	66
ДОДАТОК В.....	67
ДОДАТОК Г.....	68

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

ВСТУП

Сучасна енергетика відчуває зростаючий тиск: з одного боку - необхідність переходу на відновлювані джерела, з іншого - прагнення знизити експлуатаційні витрати та підвищити надійність інфраструктури. Сонячні електростанції вже сьогодні генерують значну частину «зеленої» енергії, але вони потребують регулярного й точного моніторингу стану тисяч фотоелектричних модулів. Уявіть собі ранкове поле панелей: сотні рядів блискучих пластин, кожна з яких має працювати бездоганно, щоб забезпечити максимальну віддачу. Традиційний огляд техніком із висотним спорядженням чи підйомним краном - це повільно, дорого і ризиковано.

Саме тут на арену виходять безпілотники. Крихітний дрон, оснащений GPS-приймачем, тепловізійною камерою й високочутливою RGB-зйомкою, здійснюється в небо й невтомно, ніби поштовий голуб, пролітає над панелями, фіксуючи кожен нюанс їхнього стану. Він бачить те, що приховано людському оку: гарячі точки, де кристали перегріваються; затінені ділянки, що знижують ефективність; мікротріщини, які можуть стати причиною відмови.

Але дрон - це лише половина історії. Інша половина - це розум, який аналізує потік даних. Алгоритми на базі комп'ютерного зору й геопросторові бази даних перетворюють сотні гігабайт зображень у чіткий звіт: "Ось три панелі потребують очищення, тут - точка перегріву, терміново перевірити з'єднання." І все це - без ризику для людини, в десятки разів швидше та з мінімальними затратами.

У результаті виникає єдина кіберфізична система, де апаратне й програмне поєднуються в єдине ціле: дрон виконує роботу в небі, а наземна інтелектуальна інфраструктура - на землі. Разом вони створюють безперервний цикл моніторингу: від планування маршруту до автоматичного занесення дефекту у базу. Це не просто політ і зйомка - це новий рівень відповідальності за «зелений» енергетичний парк, який працює безперебійно і ефективно.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА З ОДНИМ БПЛА ДЛЯ ОБ'ЇОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З GPS-НАВІГАЦІЮЄ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ І ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ

1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей кіберфізичної системи об'їоту сонячних панелей БПЛА з GPS-навігацією

Кіберфізична система (КФС) - це інтеграція обчислювальних засобів з фізичними процесами, механізм, що контролюється або моніториться комп'ютерними алгоритмами і тісно пов'язаний з фізичним світом та, за потреби, мережевими ресурсами [1].

У контексті даної роботи кіберфізична система поєднує безпілотний літальний апарат (БПЛА) з його бортовими сенсорами (моніторинговими елементами), системою навігації та наземними обчислювальними засобами у єдиний комплекс для інспекції сонячних панелей. Такий БПЛА належить до класу розвідувальних, тобто призначених для збору інформації (традиційно - військова або розвідувальна інформація), але адаптивне застосування означає використання його можливостей для цивільного моніторингу об'єктів - зокрема, стану сонячних електрофотовольтаїчних панелей [2, 3].

Розглянута кіберфізична система складається з таких основних компонентів: [4] фізична платформа БПЛА - літальний апарат (наприклад, квадрокоптер або інший тип дрона) обладнаний необхідними сенсорами; [5] бортові моніторингові елементи – датчики і пристрої збору даних (оптична камера видимого спектру, тепловізійна камера інфрачервоного спектру, модулі GPS/ГЛОНАСС для позиціонування, автопілот з інерціальними датчиками тощо); [6] бортовий обчислювач та програмне забезпечення - автопілотний контролер, що здійснює навігацію за GPS, стабілізацію польоту та первинну обробку даних; [7] канал зв'язку - бездротовий канал передачі даних (телеметрія, радіомодем або Wi-Fi/4G) для обміну інформацією між БПЛА та наземною станцією; [8] наземна станція керування та обробки - комп'ютер або пульт оператора з програмним.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпеченням для планування місії, прийому телеметрії, збереження та глибинної обробки зібраних даних; [8] користувач/оператор - людина, що відповідає за постановку задач (маршрут польоту панелей, параметри знімання) та приймає рішення на основі отриманої інформації. Всі ці компоненти разом утворюють єдиний комплекс, де фізична частина (дрон і об'єкт моніторингу - сонячні панелі) та кібернетична частина (алгоритми навігації, збору та аналізу даних) тісно взаємодіють у реальному часі [9, 10].

Призначенням такої КФС є автономний обліт сонячних панелей з метою їх інспекції та моніторингу стану. БПЛА виконує політ за заздалегідь визначеним маршрутом, побудованим на основі GPS-навігації, охоплюючи потрібну площу сонячної електростанції. Під час польоту його сенсори здійснюють моніторинг панелей - знімають у видимому та інфрачервоному діапазонах, збирають інші дані (координати, висоту, телеметрію). Отримана інформація в режимі реального часу передається на наземну станцію або зберігається на борту для подальшого аналізу [11, 12].

Ключовою особливістю є адаптивність: система може підлаштовуватися під умови середовища та завдання - наприклад, змінювати траєкторію або параметри знімання за необхідності (обліт перешкод, фокусування на проблемній ділянці, повторне сканування підозрілої панелі). Розвідувальний БПЛА, який зазвичай використовується для військової розвідки або спостереження, має технічні характеристики, що сприяють таким функціям: тривалий час польоту, стабілізовані камери з високою роздільною здатністю, можливість польоту за заданими маршрутами та передача відеоданих на великі відстані. Тому його застосування для моніторингу сонячних панелей є логічним розширенням функціоналу - фактично, це перенесення досвіду аеророзвідки у сферу контролю за станом енергетичних об'єктів [13, 14].

Переваги використання БПЛА для інспекції сонячних панелей. Традиційні методи перевірки стану сонячних батарей (візуальний огляд техніками на місці, ручне вимірювання температури окремих модулів тощо) є вкрай трудомісткими та

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

затратними за часом, особливо на великих сонячних фермах. Натомість один БПЛА здатний покрити значну площу за короткий час. Зокрема, дрон з тепловізором може обстежити сотні акрів панелей за частку того часу, який би витрачався на пошук несправностей «старим способом» [15, 16].

Це суттєво підвищує оперативність виявлення дефектів і знижує експлуатаційні витрати на перевірки. За даними галузевих оглядів, безпілотники з високоякісними оптичними та тепловими камерами дозволяють виявляти несправності, гарячі точки, забруднення чи пошкодження на сонячних модулях, не ризикуючи безпекою персоналу і не торкаючись самих панелей [17, 18].

Автоматизований обліт за допомогою GPS-навігації забезпечує стандартизоване та повторюване охоплення всієї поверхні панельних полів, що дає можливість порівнювати дані різних інспекцій у часі. Таким чином, використання БПЛА в складі кіберфізичної системи моніторингу підвищує ефективність, швидкість і точність контролю стану фотовольтаїчних систем порівняно з традиційними методами.

Висока роздільна здатність знімків і дані тепловізора забезпечують точну діагностику дефектів, а мінімальне втручання людини знижує чинник людської помилки та покращує безпеку робіт [19, 20].

Сучасні дрони здатні виконувати автономні місії різного рівня автоматизації. Більшість практичних застосувань нині відповідають рівню «автоматизованої підтримки» (Level 1) - коли маршрут польоту планується оператором шляхом задання точок, а автопілот їх послідовно облітає.

В нашому випадку це означає, що оператор визначає зону розташування сонячних панелей, після чого бортова система навігації БПЛА автоматично проводить обліт по заданому шаблону (наприклад, паралельними трасами над рядами панелей) [21]. Адаптивність же полягає у можливості системи реагувати на ситуації: при виявленні аномалій дрон може змінити режим - зробити додаткові знімки проблемної панелі з меншої висоти, або повідомити оператора для уточнення завдання. Така гнучкість особливо важлива при моніторингу великих об'єктів, де

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наперед невідомі всі проблемні зони [22]. Сучасна система обльоту сонячних панелей з використанням БПЛА є типовою кіберфізичною системою, що об'єднує фізичний об'єкт (дрон з обладнанням) та кібернетичні компоненти (програмне забезпечення управління, обробки даних і зв'язку). Структурно система складається з трьох основних частин:

- БПЛА (дрон) - автономний безпілотний апарат, оснащений навігаційним контролером (автопілотом), GPS-модулем для позиціонування, бортовими датчиками стабілізації (гіроскоп, акселерометр, висотомір) та сенсорами для зйомки сонячних панелей (наприклад, оптична камера та тепловізор);
- наземна станція управління - комп'ютер або контролер оператора, який здійснює планування польоту, передачу завдання дрону, отримання телеметрії у реальному часі і, за потреби, приймання даних з борту. Наземна станція включає програмне забезпечення для контролю місії (Ground Control Station, GCS) - наприклад, Mission Planner або QGroundControl - яке надає оператору інформацію про стан БПЛА під час польоту і дозволяє коригувати завдання;
- база геоданих панелей - інформаційна підсистема (локальна чи серверна база даних), що зберігає географічні координати сонячних панелей (або секцій панелей) та результати їх інспекції.

Основною функціональною можливістю системи є автоматичний обліт сонячних панелей за заданим маршрутом з використанням GPS-навігації та виконання аерофотозйомки для діагностики стану фотоелектричних модулів.

БПЛА діє за наперед складеним планом польоту (набором GPS-точок або шаблонним маршрутом) та виконує задачі. Автопілот дрона підтримує стабільний політ на заданій висоті та курсі, послідовно обходячи ряди сонячних панелей. Використання GPS дозволяє точно проходити точки маршруту і покривати всю цільову площу. Маршрут зазвичай планується у вигляді паралельних треків (ланцюжок «змійкою») над полем панелей для повного охоплення без пропусків. У великих сонячних парках маршрут може ділитися на кілька сегментів, щоб врахувати обмежений час польоту одного акумулятора.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 - Безпілотний літальний апарат з встановленою тепловізійною камерою в процесі обльоту сонячних панелей для їх інспекції [41]

Пілот або система може розбити територію на менші квадрати чи «блоки», кожен з яких дрон облітає окремо, після чого виконується заміна батареї і продовження місії на наступному блоці [23].

Збір візуальної інформації. На борту дрон несе камери, які здійснюють зйомку панелей. Мінімально достатньо встановити звичайну RGB-камеру високої роздільної здатності для виявлення видимих пошкоджень (бруд, тріщини, затінення). Проте найбільш інформативною є тепловізійна камера (інфрачервоний сенсор), яка вимірює температуру поверхонь панелей. Комбінація видимого діапазону та ІЧ (dual-sensor payload) наразі вважається кращою практикою для інспекції, оскільки дає змогу виявляти аномалії нагріву (гарячі точки) та одночасно бачити фізичні причини (наприклад, сміття чи тінь). передача та запис даних. Під час польоту телеметрична інформація (GPS-координати, висота, стан батареї, тощо) передається на наземну станцію у реальному часі по радіоканалу. Це дозволяє оператору стежити за виконанням місії та станом дрона. У разі потреби (нештатна ситуація, перешкода) оператор може перейти в режим ручного керування або скоригувати завдання. Що стосується зображень, існує кілька

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливих підходів. Найпоширеніший - запис фото/відео на бортовий носій (карта пам'яті) для подальшої обробки після приземлення.

Застосування одного автоматизованого дрона для інспекції сонячних панелей дає значні переваги у порівнянні з традиційними методами (візуальний огляд техніком або стаціонарні вимірювачі) [24].

По-перше, це значно швидше та менш трудомістко. За оцінками, дрон може скоротити час обстеження великої сонячної електростанції до ~15% від часу ручного обходу - економія ~85% часу і людських зусиль.

По-друге, підвищується точність і повнота перевірки: дрон здатен оглянути кожен модуль, виявити дрібні гарячі точки або дефекти, непомітні неозброєним оком на відстані. По-третє, забезпечується безпека - виключається потреба підніматися на конструкції, відключати панелі або працювати під високою напругою, оскільки огляд безконтактний і виконується з повітря.

Аналізуючи функціональні можливості такої системи, слід зазначити деякі технічні особливості та виклики.

По-перше, автономність польоту обмежена ємністю батареї дрона - типовий мультикоптер може перебувати в повітрі 20-30 хвилин. Це означає, що великі площі (десятки гектарів) потребуватимуть кількох вильотів або проміжної підзарядки/заміни акумулятора.

По-друге, точність GPS-навігації звичайного рівня ($\pm 3-5$ м) може бути недостатньою для ідентифікації конкретного модуля безпосередньо, але цього вистачає для правильного перекриття знімків і створення мозаїки. За потреби більшої точності позиціонування застосовують диференційний GPS або RTK-модулі.

По-третє, зйомка тепловізором залежить від умов: навколишня температура, сонячна радіація, час доби. Щоби отримати чітку теплову картину, панелі мають бути достатньо прогріті працюючим струмом. З одного боку, рекомендують виконувати обльоти у яскравий сонячний час (опівдні) при освітленості >600 Вт/м², коли гарячі точки добре контрастують на фоні справних елементів. З іншого боку, надмірне сонячне випромінювання вдень може спричинити відблиски і високий

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фон температур, тому деякі дослідження вказують, що оптимально проводити тепловізійну зйомку вранці або ближче до вечора, коли контраст температур дефектів відносно нижчий, а прямих відблисків менше.

По-четверте, система з одним дроном має обмежену продуктивність: в один момент часу облітається лише одна ділянка. Якщо потрібен моніторинг дуже великої електростанції за короткий строк, можливо доведеться залучати кілька БПЛА або збільшувати швидкість польоту і висоту (що знижує роздільну здатність знімків).

1.2 Огляд відомих рішень та засобів для відстеження якості повітря із збереженням даних у хмарі

Для ефективної роботи описаної кіберфізичної системи необхідне належне програмне та апаратне забезпечення, яке відповідає задачам збору, передачі, збереження та обробки інформації. Моніторингові елементи БПЛА генерують великі обсяги даних (високоякісні зображення, відео, телеметрія), тому архітектура системи повинна забезпечувати їх надійну фіксацію і подальший аналіз у зручній для користувача формі. Розглянемо складові обробки інформації у такій системі та сучасні технології, що при цьому застосовуються. Основними джерелами даних є оптична камера видимого діапазону та інфрачервона (тепловізійна) камера, встановлені на БПЛА. Вони здійснюють одночасну фото- і відеозйомку сонячних панелей у двох спектрах, що необхідно для повноцінної діагностики: інфрачервоні зображення дозволяють виявити теплові аномалії - перегріті панелі чи їх ділянки (так звані «гарячі точки»), спричинені внутрішніми дефектами або відмовою елементів [25,26].

Натомість знімки у видимому спектрі дають змогу розрізнити фізичні пошкодження або сторонні об'єкти та забруднення (листя, пташиний послід, пил) на поверхні панелей. Поєднання двох типів зображень є стандартом: зазвичай,

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обліт виконується з одночасною роботою обох камер, що значно економить час (альтернативою був би подвійний політ - окремо для видимого і ІЧ-діапазону) [27].

Для цього дрон має достатню вантажопідйомність, щоб нести обидва сенсори одразу. Первинна обробка на борту може включати: стабілізацію зображення (через гіростабілізоване підвісне кріплення камери), компресію даних, геотегування (додавання до кожного кадру координат GPS і висоти) та буферизацію даних на вбудованому носії (наприклад, карті пам'яті). Автопілот також записує телеметричні параметри польоту (курс, швидкість, прискорення, стан систем) і може здійснювати елементарний аналіз, як-от виявлення відмов обладнання чи відхилення від маршруту, із подальшим коригуванням польоту в реальному часі. Передача даних та наземна інфраструктура. У реальному масштабі часу найважливіша інформація - це телеметрія польоту і, за можливості, низькороздільні копії зображень (або відеопотік) для оперативного контролю. Вона передається через канал зв'язку (наприклад, за допомогою радіомодему на частоті ~900 МГц або по Wi-Fi/4G) на наземну станцію [28, 29].

Наземна станція представлена комп'ютером або спеціалізованим пультом, що виконує дві основні ролі: центр керування польотом (Mission Control) та центр обробки даних. З погляду керування, станція приймає телеметрію, відображає поточне місцеположення дрона, його висоту, швидкість, стан батареї тощо, часто на цифровій карті або у вигляді приладів. Оператор може вносити корективи наприклад, коригувати маршрут або давати команду на повернення додому. З погляду обробки даних, наземна станція отримує масиви фото/відео після завершення польоту (або в процесі, якщо канал дозволяє високу пропускну здатність) [30].

Для ефективного завантаження даних після приземлення БПЛА може застосовуватися вилучення карти пам'яті чи передача через високошвидкісний інтерфейс (USB3, Wi-Fi 6 тощо). Отримані зображення сонячних панелей потребують подальшої обробки і аналізу з метою виявлення дефектів. Існують сучасні програмні рішення, що автоматизують цей процес. До них належать

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи комп'ютерного зору та штучного інтелекту: наприклад, алгоритми обробки зображень можуть розпізнавати аномальні температурні області на ІЧ-знімках і класифікувати їх (пошкоджений осередок, відключена панель, тінь або забруднення)[31,32].

Використання технологій машинного навчання дозволяє досягти високої точності - існують рішення, що досягають понад 98% точності у визначенні дефектних панелей на основі аеро-фотоінформації. На практиці обробка може відбуватися у кілька етапів: [33]

Створення ортофотоплану: з множинних знімків, отриманих дроном з перекриттям, програмне забезпечення виконує побудову ортофотографічної мозаїки (зведеного зображення усіх панелей) за допомогою алгоритмів фотограмметрії (Structure from Motion тощо)[34].

Це дозволяє отримати глобальну картину поля сонячних батарей, на якій можна локалізувати проблемні ділянки більш наочно. Як приклад, на Рис. 2 наведено фрагмент теплової ортофотокарти: на ній яскраво виділяються панелі з підвищеною температурою.

Аналіз теплових зображень: програмні модулі сканують ІЧ-ортофотоплан (або окремі знімки) у пошуках областей, що перевищують фонову температуру. Враховуються допустимі відхилення, викликані, скажімо, нерівномірним освітленням, та виконується фільтрація хибних спрацьовувань. Наприклад, якщо на видимому знімку тієї ж області зафіксовано птахів або бруд на панелі, то відповідне локальне нагрівання не інтерпретується як дефект модуля, а визначається як зовнішнє забруднення [35].

Для поєднання цих даних софт може накладати теплові зображення на звичайні.

Виявлення й класифікація дефектів: після виявлення підозрілих зон система аналізує їх форму, площу та інтенсивність нагріву. Різні типи дефектів мають характерні ознаки на теплокарті: відключена панель або стрінг зазвичай виглядає як рівномірно тепліша вся панель (де енергія не віддається в мережу і нагріває

модуль), точковий гарячий осередок свідчить про локальне пошкодження елемента (яскрава точка на панелі), тінь або забруднення проявляються як прохолодні ділянки на ІЧ-зображенні, але помітні на звичайному фото. Алгоритми можуть автоматично присвоювати категорії знайденим аномаліям (наприклад, “Hotspot - можливий дефект елемента”, “Hot panel - ймовірне відключення”, “Shadow - затінення” тощо). Сучасні системи на базі AI здатні мінімізувати хибні тривоги і надавати оператору короткий список реальних проблем [36].

Збереження результатів та інтерфейс: результати обробки виявлені дефекти, температурні показники, фотографії зберігаються у базі даних або у вигляді звіту.

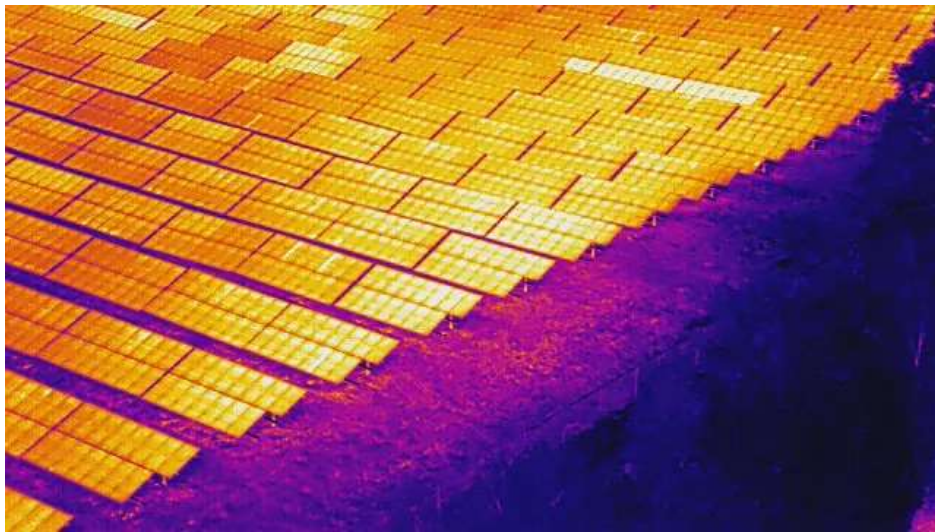


Рисунок 1.2 – Теплова ортофотокарта фрагмента поля сонячних панелей, отримана в результаті обльоту дроном [42]

Яскравіші (жовто-оранжеві) ділянки вказують на підвищену температуру окремих панелей, що може сигналізувати про несправність або забруднення.

Бортова апаратура та комп’ютерні засоби. БПЛА виконує не лише функцію «літаючої камери», а й виступає як платформа збору та початкової обробки даних, тобто є елементом IoT/кіберфізичної системи. Розглянемо апаратно-програмні засоби, що забезпечують обробку інформації на борту дрона під час інспекції. Основним керуючим елементом є бортовий контролер польоту (автопілот) мікрокомп’ютер, що стабілізує дрон і виконує навігацію. Сучасні автопілоти (такі

як Pixhawk з прошивкою ArduPilot, або контролери DJI і Auterion) мають достатню обчислювальну потужність для керування польотом та можуть виконувати додаткові функції, як-от управління камерою чи реєстрація даних [37].

Синхронізація геоданих з даними сенсорів. На борту здійснюється формування пакетів даних, що поєднують показання GPS, часу та індексу зображення. Це необхідно для подальшої побудови карти дефектів. Деякі камери (особливо мультиспектральні, що застосовуються в агромоніторингу) підтримують пряме накладення геотегів у EXIF світлини, якщо отримують сигнал GPS. В інших випадках авіоніка дрона реєструє події (наприклад, команда «зроблено фото №123») у телеметричному лог-файлі, після чого на землі можна виконати «geotagging» вписати координати в метадані JPEG-файлів. Так чи інакше, завдання програмно-апаратних засобів мінімізувати розсинхронізацію та похибки між позицією дрона і моментом зйомки, щоб точно прив'язати кожне зображення до розташування панелей [38].

Побудова ортофотоплану - зшивання серії знімків в єдину масштабовану карту (мозаїку) місцевості. Це виконується алгоритмами фотограмметрії (Structure-from-Motion, орторектифікація). Отриманий ортофотоплан сонячної електростанції дозволяє наочно відобразити всі панелі та локалізувати дефектні секції [39, 40].

1.3 Висновки. Постановка задачі

Головною метою проєкту є створення кіберфізичної системи з одним БПЛА, яка б ефективно виконувала обстеження сонячних панелей, забезпечувала обробку та передачу зібраної інформації, а також мала адаптивні можливості для динамічного реагування на змінні умови середовища.

На першому етапі визначено науково-технічну проблему: оптимізація процесу збору, обробки та передачі даних при використанні одного дрона для моніторингу. Це, зокрема, включає пошук балансу між обсягом зібраної інформації та її цінністю для подальшої аналітики. Наприклад, занадто деталізовані знімки

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводять до накопичення гігантських обсягів даних, що ускладнює оперативну обробку. Водночас, зниження якості може призвести до втрати важливих деталей. Отже, основне завдання полягає у визначенні оптимальних параметрів польоту (висоти, перекриття, кута зйомки), які гарантували б точність виявлення дефектів при мінімізації надмірного навантаження на систему.

Завершальним етапом є створення прототипу та його випробування. Це включає вибір дрона, підбір обладнання (камери, тепловізори, GPS-модулі), розробку відповідного програмного забезпечення та проведення польових тестів на полігоні з сонячними панелями.

На основі зібраних даних буде оцінено, наскільки розроблена система перевершує базові підходи з точки зору ефективності, зручності використання та потенціалу до масштабування. Кінцева мета - створити доступне, автономне рішення для регулярного обстеження фотоелектричних полів, яке забезпечуватиме високу точність діагностики при мінімальних витратах часу й ресурсів

У першому розділі проведено огляд та аналіз предметної області, пов'язаної з використанням розвідувальних БПЛА в якості основи кіберфізичних систем для моніторингу сонячних панелей. Розглянуто структурно-функціональні особливості такої системи: виділено основні компоненти (літальний апарат, сенсори, системи зв'язку, наземний центр обробки).

Проаналізовано сучасне апаратне та програмне забезпечення, що може бути використане в такій КФС: тепловізійні та оптичні камери високої роздільної здатності, автопілоти з GPS-навігацією, канали телеметрії, а також програмні інструменти для обробки аерофотознімків і виявлення аномалій.

На основі виконаного аналізу сформульовано постановку задачі дослідження. Головна мета - розробити та вдосконалити кіберфізичну систему з одним БПЛА для інспекції сонячних панелей, приділивши особливу увагу механізмам обробки інформації..

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ОБЛЬОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА З GPS-НАВІГАЦІЄЮ

2.1 Визначення апаратних компонентів, вибір БПЛА, GPS-модуля, сенсорів для зйомки панелей

Проєктування кіберфізичної системи моніторингу розпочинається з чіткого визначення її підсистем, як апаратних, так і програмних, які у сукупності реалізують функції збору, обробки та аналізу інформації. На основі проведеного аналізу сформуємо склад програмно-технічного комплексу (ПТК) системи, що включає обладнання та програмне забезпечення, необхідні для виконання поставлених завдань. Для реалізації системи обльоту сонячних панелей обрано квадрокоптерний тип безпілотного літального апарата (БПЛА), оскільки мультикоптери здатні стабільно зависати над панелями та маневрувати з малою швидкістю, що ідеально підходить для детальної інспекції порівняно з крилатими дронами.

Базова апаратна платформа - квадрокоптер із діагоналлю каркаса ~450-550 мм, оснащений 4–6 безколекторними двигунами, регуляторами швидкості (ESC) та гвинтами. Платформа включає:

Корпус і планер: рама, двигуни, шасі, що забезпечують стабільний політ і маневреність для обльоту рядів панелей на невеликій висоті.

Силова установка: літій-полімерний (LiPo) акумулятор високої ємності (наприклад, 4S, 14,8 В, 10–20 А·год або 6S, 22,2 В), який забезпечує 15-30 хвилин польоту з урахуванням сенсорного навантаження. Модуль живлення стабілізує напругу (5 В) для бортової електроніки.

Автопілот: контролер Pixhawk 4 (з 32-бітним процесором і резервним співпроцесором) або аналог із прошивкою ArduPilot/PX4, який відповідає за стабілізацію, навігацію та виконання місій. Приклади платформ: промисловий дрон DJI Matrice 300 або саморобна система на базі рами 550 мм із контролером Pixhawk.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

GNSS-модуль: U-blox NEO-M8N (підтримка GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, чутливість -167 дБм, захист від перешкод) для визначення координат і висоти з підтримкою SBAS.

Інерціальна навігаційна система (INS): включає акселерометри, гіроскопи, магнітометр і барометр, інтегровані в автопілот для стабілізації та вимірювання параметрів руху.

Датчики висоти: лазерний або ультразвуковий далекомір для точного утримання висоти над панелями.

Сенсорна підсистема моніторингу забезпечує збір даних про стан сонячних панелей:

RGB-камера: високоякісна камера видимого спектра (наприклад, 20 Мп з CMOS-сенсором 1", як у DJI Phantom 4 Pro, Mavic 3, або легка екшн-камера типу GoPro) для виявлення забруднень, тріщин тощо. Підтримує серійну зйомку або відео.

Тепловізор: камера FLIR (Vue Pro R, Tau 2 або XT2) з роздільною здатністю 640×512 пікселів, частотою 30 Гц і чутливістю $<0,05^\circ\text{C}$ для виявлення температурних аномалій. Підтримує вивід аналогового/цифрового сигналу, поле зору $32^\circ \times 26^\circ$.

Стабілізований підвіс (гімбал): компенсує коливання дрона, забезпечуючи рівномірне покриття кадру.

Блок зберігання даних: картка пам'яті високої ємності та швидкості для запису зображень під час польоту.

Підсистема зв'язку реалізує бездротовий обмін даними:

Телеметрійний радіомодем: SiK-модем (3DR Radio, 915/433 МГц) для передачі команд і телеметрії (координати, висота, стан батареї) на відстань до кількох кілометрів.

Модуль передачі відео: цифровий (DJI Lightbridge, OcuSync) або аналоговий (5,8 ГГц FPV) для живого відеосигналу.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Wi-Fi модуль (ESP8266/ESP32): альтернатива для коротких відстаней, дозволяє керувати місією через смартфон/ноутбук (наприклад, через QGroundControl).

Мобільний зв'язок (4G/LTE): опціонально для хмарного підключення та прямого завантаження даних.

Наземна апаратна підсистема (наземна станція) включає ноутбук або планшет (наприклад, CrystalSky або стандартний Android/iOS) із встановленим програмним забезпеченням Ground Control Station (GCS). Обладнання оснащено приймачем/передавачем телеметрії, приймачем відеосигналу та пультом дистанційного керування. Вимоги: потужний CPU/GPU, ≥ 16 ГБ ОЗУ, SSD для обробки високороздільних зображень і роботи алгоритмів аналізу.

Запасні акумулятори та зарядні пристрої для безперервного циклу польотів.

Стартовий майданчик (landing pad) для захисту від пилу та забезпечення GPS-видимості.

Транспортні кейси, інструменти, калібрувальні мішені для камер, сервісні кабелі.

Програмне забезпечення автопілота (бортове ПО)

Прошивка ArduCopter (ArduPilot) або PX4, що відповідає за стабілізацію, GPS-навігацію, виконання місій за маршрутом, утримання висоти та failsafe-логіку (аварійне повернення при втраті зв'язку чи низькому заряді). Підтримує скрипти (наприклад, Lua) для автоматизації завдань, таких як увімкнення/вимкнення камер, керування гімбалом, маркування зображень координатами. Тісно взаємодіє з сенсорною підсистемою для точного позиціонування.

Програмне забезпечення наземної станції (GCS-софт) включає програми для планування місій і моніторингу польоту (Mission Planner, QGroundControl, DJI Pilot, Autel Explorer). Надає інтерфейс для завдання маршрутів (наприклад, полігон польоту з автоматичним розбиттям на «змійки»), передачі команд на борт, відображення телеметрії в реальному часі та перегляду живого відео. Зберігає лог-файли та завантажує зображення після польоту.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Побудова ортофотоплану: Pix4Dmapper, Agisoft Metashape, OpenDroneMap.

Аналіз зображень: FLIR Thermal Studio для теплового аналізу, власне ПО на Python/C++ з бібліотеками OpenCV, TensorFlow для AI-виявлення дефектів.

База даних: SQLite або PostgreSQL для збереження результатів інспекції (координати, температури, типи дефектів, час обльоту).

Інтерфейс користувача та засоби візуалізації забезпечують наочне представлення результатів:

Веб-додаток або модуль GCS із панеллю приладів (dashboard), що відображає карту сонячної електростанції з підсвічуванням панелей за станом (норма, дефект).

GIS-технології (GeoJSON) або PDF-звіти із вкладеними зображеннями для зручного прийняття рішень щодо ремонту/чищення панелей.

Усі підсистеми узгоджені за інтерфейсами та форматами даних. БПЛА збирає дані через сенсори та передає їх наземній станції через модулі зв'язку. Наземна станція обробляє отримані зображення, будує ортофотоплани, аналізує дефекти та формує звіти для користувача. Структурна схема складається з взаємодії підсистем апаратний рівень дрона (корпус, сенсори, контролери), апаратний рівень наземної станції, системне та прикладне ПО спільно реалізують функціональність кіберфізичної системи моніторингу.

Програмно-технічний комплекс системи охоплює апаратні компоненти (БПЛА, сенсори, наземна станція) та програмні засоби (автопілот, GCS, обробка даних, візуалізація), які забезпечують точний обліт, збір даних і аналіз стану сонячних панелей. Використання надійних компонентів, таких як Pixhawk 4, FLIR-тепловізори та U-blox GNSS, гарантує стабільність і точність системи.

У сучасному світі, де відновлювані джерела енергії набувають дедалі більшого значення, ефективність сонячних електростанцій залежить від своєчасного виявлення дефектів панелей. Кіберфізична система моніторингу на базі безпілотного літального апарата (БПЛА) пропонує інноваційний підхід до інспекції, поєднуючи апаратні та програмні компоненти для автоматизованого збору, обробки та аналізу даних. Програмне забезпечення такої системи відіграє

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ключову роль, забезпечуючи управління польотом, обробку зображень, збереження геоданих і надання результатів у зручному вигляді. Цей есеї присвячений огляду програмних підсистем кіберфізичної системи моніторингу, їхньої взаємодії та значення для ефективної інспекції сонячних панелей.

На борту БПЛА, оснащеного контролером Pixhawk 4, працює прошивка ArduCopter, що входить до платформи ArduPilot. Ця операційна система реального часу є фундаментом системи, керуючи всіма бортовими процесами. Вона забезпечує стабілізацію дрона за допомогою PID-контурів, які обробляють дані інерціального вимірювального модуля (IMU), включаючи акселерометри та гіроскопи. Завдяки навігаційним алгоритмам ArduCopter утримує задану висоту, позицію та виконує політ за GPS-координатами, розраховуючи оптимальну траєкторію. Режими польоту, такі як Stabilize, Loiter та Auto, дозволяють оператору гнучко керувати дроном, при цьому автономний режим Auto є основним для виконання запланованих місій.

Особливу увагу приділено логіці місії: ArduCopter виконує послідовність команд, включаючи зліт, проліт заданих точок (WAYPOINT) і періодичне спрацьовування камер кожні 10 метрів (команда DO_SET_CAM_TRIGG_DIST). Це забезпечує синхронізовану зйомку RGB- та тепловізійними камерами, що критично для збору даних про стан панелей. Управління гімбалом дозволяє стабілізувати камери вертикально вниз, компенсуючи рухи дрона, а механізми безпеки, такі як повернення до точки зльоту (RTL) при низькому заряді батареї чи втраті зв'язку, підвищують надійність системи. ArduCopter також записує логи на microSD-карту, фіксуючи GPS-трек, події камери (CAM messages) із координатами та діагностичні дані, що є основою для подальшої геоприв'язки знімків.

Відкритість ArduPilot і підтримка протоколу MAVLink роблять прошивку гнучкою: вона дозволяє інтегрувати додаткові скрипти (наприклад, на мові Lua) або підключати бортовий комп'ютер для розширення функціональності. У нашій системі використано базові можливості прошивки, що виявилися достатніми для виконання завдань, демонструючи її надійність і універсальність.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На наземній станції, яка зазвичай представлена ноутбуком, працює програма Mission Planner - основна наземна станція керування (GCS) для ArduPilot. Ця програма забезпечує повний цикл взаємодії з дроном: від планування маршруту до моніторингу польоту. Mission Planner дозволяє оператору створювати маршрут, задаючи точки на карті або автоматично генеруючи сітку покриття для рівномірного обльоту сонячних панелей. З урахуванням рекомендацій Raptor Maps, ми встановили фронтальне перекриття знімків на рівні 70% і бокове - 20%, щоб кожна панель потрапляла в кілька кадрів, підвищуючи точність аналізу.

Після створення маршруту його можна завантажити на автопілот заздалегідь через телеметрію або зберегти в пам'яті Pixhawk для активації на полі. Під час польоту Mission Planner відображає телеметрію в реальному часі: позицію дрона, висоту, швидкість, рівень заряду батареї. Опціонально програма приймає аналоговий FPV-відеосигнал для оперативного нагляду, хоча основні дані (фото) переносяться після посадки. Mission Planner також зберігає телеметричні логи як резерв, що важливо для захисту даних у разі втрати бортової SD-карти. Хоча альтернативою може бути QGroundControl, Mission Planner обрано через тісну інтеграцію з ArduPilot і зручний інструмент геотегування знімків залогами польоту.

Найскладнішим і водночас інноваційним компонентом системи є програмне забезпечення для обробки зібраних зображень і збереження результатів у базі геоданих. Після польоту дані з RGB- і тепловізійних камер переносяться на наземний комп'ютер. RGB-зображення обробляються фотограмметричними пакетами, такими як Agisoft Metashape або Pix4D, для створення ортофотопланів або 3D-моделей. Однак основна увага приділяється тепловізійним знімкам, які аналізуються за допомогою Python-скрипта на базі бібліотек OpenCV і NumPy.

Скрипт виконує багатоступеневий аналіз: згладжування зображення, нормалізацію, порогове сегментування для виділення гарячих точок (температура на 15°C вище середньої), кластеризацію пікселів і фільтрацію шумів. Для кожної аномалії визначаються центроїд, максимальна температура та площа. Паралельно

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналізується відповідний RGB-знімок для виявлення причин аномалій, таких як бруд або тіні, шляхом порівняння яскравості. Геоприв'язка знімків виконується за допомогою лог-файлу Pixhawk: утиліта зчитує координати подій CAM і обчислює географічні координати аномалій, враховуючи зміщення від центру кадру.

Результати аналізу інтегруються в реляційну базу даних, реалізовану на PostgreSQL із розширенням PostGIS. PostGIS забезпечує підтримку геометричних об'єктів і просторових запитів, дозволяючи зберігати координати панелей, журнали інспекцій, аномалії та плани обслуговування. Таблиці бази включають Panels (інформація про панелі), Inspections (обльоти), Anomalies (дефекти) і Maintenance (ремонт). Скрипт автоматично прив'язує аномалії до найближчих панелей за координатами, а PostGIS дозволяє виконувати запити, наприклад, для пошуку дефектних панелей у заданій зоні. Така структура забезпечує не лише збереження даних, але й їх аналіз для довгострокового моніторингу стану електростанції.

Для зручного представлення результатів розроблено інтерфейс, який може бути реалізований у вигляді GIS-проекту в QGIS, веб-додатка з панеллю приладів або PDF-звіту. Веб-інтерфейс відображає карту сонячної ферми, де панелі підсвічені залежно від стану (норма, дефект), використовуючи GeoJSON-формати для інтеграції з GIS-системами. PDF-звіти містять таблиці аномалій і вкладені зображення, що спрощує прийняття рішень щодо ремонту чи очищення панелей. Такий підхід робить результати доступними для операторів і менеджерів електростанції.

Перед реальними польотами система тестувалася у симуляторі SITL (Software In The Loop) від ArduPilot, де моделювалися сценарії обльоту, перевірялася робота тригерів камери та логування. Додаткові утиліти, такі як MAVProху для командного керування через MAVLink і фреймворк DroneKit на Python для експериментів із автоматизацією, допомогли налагодити систему. Хоча деякі функції, як-от автономний зліт, було замінено стандартним режимом Auto, ці інструменти підтвердили гнучкість системи.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модульна структура системи дозволяє оновлювати окремі компоненти без впливу на інші. Наприклад, алгоритми обробки зображень можна вдосконалити, додавши нейронні мережі, або замінити Mission Planner на QGroundControl. Відкриті протоколи (MAVLink, EXIF, SQL) і формати даних забезпечують сумісність із зовнішніми сервісами, такими як платформи управління активами сонячних станцій. Це робить систему адаптивною до різних сценаріїв і потреб.

Програмне забезпечення кіберфізичної системи моніторингу сонячних панелей - це складний, але гармонійний комплекс компонентів, що охоплює вбудовану прошивку ArduCopter, наземну станцію Mission Planner, алгоритми обробки даних на Python із OpenCV і GeoPandas, а також геопросторову базу даних PostgreSQL/PostGIS. Ці підсистеми забезпечують повний цикл інспекції: від планування місії до аналізу дефектів і формування звітів. Модульність, використання відкритих стандартів і гнучкість реалізації дозволяють системі не лише ефективно виконувати поточні завдання, але й адаптуватися до майбутніх викликів, сприяючи розвитку автоматизованих рішень для відновлювальної енергетики.

Розроблено скрипт на Python з використанням бібліотеки OpenCV та NumPy. Цей скрипт по черзі відкриває кожен тепловий знімок (у форматі TIFF з записаними температурами або у псевдокольорі JPG) та виконує аналіз. Спершу виконується згладжування та нормалізація зображення. Далі, використовуючи метод порогового сегментування, виділяються області з температурою, вищою на ΔT від середньої по кадру. ΔT встановлено, наприклад, 15°C - тобто все, що на 15 градусів гарячіше, ніж середня температура панелей в кадрі, вважається підозрілим пікселем. З цих пікселів групуються контури (кластеризація суміжних точок) і відфільтровуються дрібні плями (менше певної площі, щоб відкинути шуми). Для кожного контуру визначається його центроїд і максимальна температура.

Паралельно той самий скрипт бере відповідний RGB-знімок (близький за часом або позицією) і робить його аналіз - перевіряє, чи є там очевидні причини: темна пляма (бруд) або тінь. Це можна зробити простим порівнянням яскравості

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

області: якщо на RGB є темний регіон, а на тепловому там гаряче - це типowo затінення або бруд, який викликає нагрів (бо панель не виробляє струм).

В результаті роботи скрипта для кожного кадру генерується список знайдених аномалій з їх координатами на знімку, максимальною температурою і площею. Але ці координати ще потрібно перевести в географічні.

Геоприв'язка виконується за допомогою даних лог-файлу: пам'ятаємо, що Píxhawk записав координати кожного кадру. Ми написали утиліту, що зчитує лог, знаходить подію САМ з тим же номером, що і знімок, і отримує географічну широту/довготу. Припустимо, в кадрі знайдено гарячу область, яка відповідає конкретній панелі - щоб знайти реальні координати цієї панелі, вважаємо, що вона знаходиться під центром кадру (або використовуємо поправку, якщо аномалія не в центрі, - для спрощення можна обчислити зміщення в метрах знаючи масштаб знімка).

Після цього для кожної аномалії визначено приблизні GPS-координати. Далі ці координати можна співставити з базою даних панелей.

База геоданих та інтерфейс. Спроектовано реляційну базу даних, що містить інформацію про сонячні панелі на об'єкті. Структура БД включає таблиці:

Panels (Панелі) - список окремих фотоелектричних модулів або секцій. Поля: PanelID (унікальний ID), Location (координати центру панелі, широта/довгота або індекс ряду і стовпця), InstalledDate, TechnicalData (потужність, виробник) тощо.

Inspections (Інспекції) - журнал обльотів. Поля: InspectionID, Date, Operator, Notes.

Anomalies (Аномалії) - виявлені дефекти, які дрон зафіксував під час моніторингу сонячних панелей. Поля: AnomalyID, InspectionID (зв'язок який обліт), PanelID (якої панелі стосується, може бути Null якщо не прив'язано), Type (тип дефекту: hotspot, crack, shadow, etc), Temperature (макс. температура, якщо є), Severity (рівень критичності), ImageRef (посилання на файл знімка або на ортофотоплан), Comment.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Maintenance (Обслуговування) - планувальник ремонтів, де відзначається якщо дана панель очищена або замінена після дефекту

Заповнення бази може виконуватися напівавтоматично: результати з нашого скрипта (список аномалій з координатами) завантажуються і для кожної аномалії намагаються знайти найближчу панель з таблиці Panels (за різницею координат менше певного порогу, наприклад 5 м). Якщо знайдено то запису присвоюється її PanelID, якщо ні - можна створити новий запис панелі або віднести до групової аномалії (наприклад, тінь на групі панелей). Всі такі записи додаються в таблицю Anomalies з прив'язкою до поточного InspectionID. В результаті маємо в БД перелік всіх проблемних панелей, виявлених під час обльоту, з необхідними деталями. Для зручності перегляду інформації може бути реалізований простий інтерфейс, наприклад, GIS-проект у QGIS або веб-інтерфейс, який відображає карту панелей і маркери проблем. Але в рамках цієї роботи достатньо підготувати звіт і таблиці в БД.

Додаткові програмні засоби. Слід згадати про один з найважливіх моментів при створенні приладу, а саме калібрування та тестування. Перед практичним застосуванням важливо завжди першим чином перевірити чи працює прилад так як заплановано і чи відповідають його налаштування заданим параметрам. Перед як дрон приступив до виконання справжніх місій, проводилося моделювання у середовищі SITL (Software In The Loop), яке надає ArduPilot. У віртуальному симуляторі були програні сценарії польоту над умовним полем, перевірена робота тригера камери, заповнення логів. Таке використання симуляцій дуже корисне у тестуваннях адже воно дозволило налагодити параметри, не ризикуючи реальним дроном, тим самим уникаючи усі можливі ризики, які могли б виникнути при використанні реального дрона у тестових польотах.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Опис взаємодії між БПЛА, наземною станцією і базою геоданих панелей.

Алгоритм взаємодії системи

Кіберфізична система моніторингу сонячних панелей за допомогою безпілотного літального апарата (БПЛА) є гарним прикладом реалізації інтеграції як апаратних так і програмних компонентів, що дозволяють нам створити умови для автоматизації складних завдань. Центральним аспектом ефективності цієї кіберфізичної системи моніторингу сонячних панелей є чітка взаємодія між підсистемами: БПЛА з бортовим обладнанням, наземною станцією керування та базою геоданих. Ці системи тісно взаємодіють між собою. Ця взаємодія охоплює етапи планування місії, виконання обльоту та обробки даних, формуючи замкнений цикл моніторингу. Розглянемо структурну організацію нашої системи, потоки інформації, їх обмін між її компонентами та їхній внесок, що вони привносять у створення цілісної моделі управління активами сонячної електростанції.

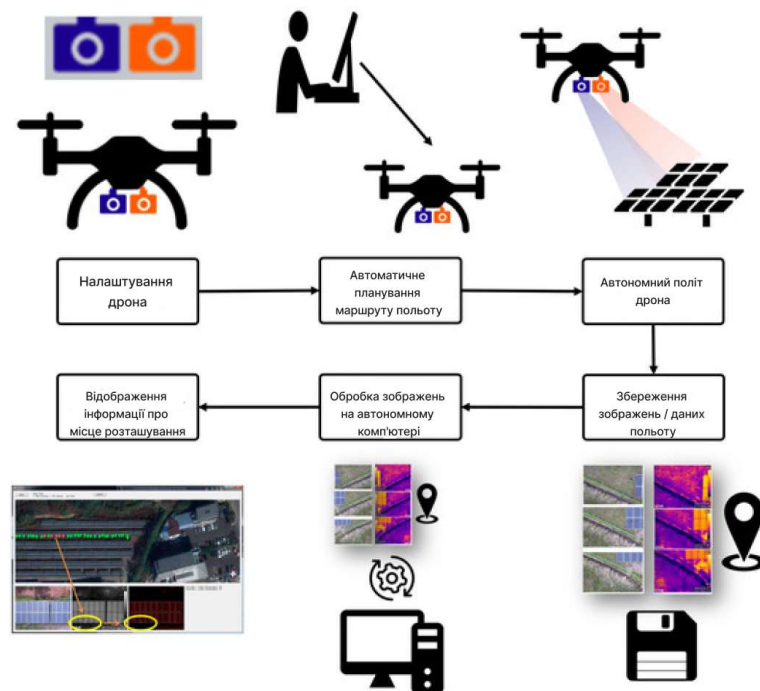


Рисунок 2.1 – Структурна схема кіберфізичної системи для моніторингу сонячних панелей за допомогою БПЛА



Рисунок 2.2 – Алгоритм роботи кіберфізичної системи для моніторингу сонячних панелей за допомогою БПЛА

Дана кіберфізична система моніторингу сонячних панелей складається з трьох основних підсистем, як було показано на структурній схемі (рис. 2.1). Перша - БПЛА, оснащений сучасним та надійним автопілотом Pixhawk 4, датчиками для геолокації (GPS, компас, IMU, барометр) і камерами для запису польоту (RGB і тепловізор). Автопілот Pixhawk 4 відповідає за навігацію БПЛА, стабілізацію та збір даних під час польоту. Друга - наземна станція керування БПЛА (ноутбук із програмою Mission Planner), яка є нашим центром планування місій, моніторингу та обробки результатів, що були отримані під час виконання польоту сонячних панелей. Третя - база геоданих (реалізована на PostgreSQL із розширенням PostGIS), що зберігає координати панелей, журнали інспекцій і виявлені аномалії. Ці підсистеми обмінюються даними через чітко визначені потоки: телеметрія та зображення від БПЛА до наземної станції, команди й маршрути для руху від станції до БПЛА, а також результати аналізу до бази даних із можливістю отримання з неї координат для подальшого планування.

Процес моніторингу БПЛА починається з підготовки, де першу ключову роль відіграє наземна станція та оператор. На цьому етапі оператор на наземній станції використовує Mission Planner для створення маршруту який буде облітати БПЛА, спираючись на карту або план розміщення сонячних панелей. Якщо база даних містить координати панелей (наприклад, таблиця Panels із широтою/довготою або індексами рядів), ці дані експортуються для відображення меж масиву. Оператор задає параметри маршруту: висоту польоту (наприклад, 30 м), швидкість (5 м/с), відстань між лініями, фронтальне (70%) і бокове (20%) перекриття знімків. База даних може вказати пріоритетні зони зйомки (сектори з попередніми дефектами), дозволяючи налаштувати щільнішу зйомку.

Після того як маршрут вже сформований (сітка waypoints) він завантажується на автопілот БПЛА через телеметрійний радіоканал. Mission Planner оцінює енергоспоживання, порівнюючи довжину маршруту з відомими характеристиками батареї, і за потреби маршрут розбивається на частини. Перед стартом перевіряється зв'язок (сила сигналу RSSI) і стан дрона, що забезпечує готовність до польоту. Хоча база даних не є обов'язковою на цьому етапі, її використання оптимізує планування, надаючи точні дані про об'єкт.

Під час виконання місії БПЛА працює в автономному режимі, а наземна станція забезпечує моніторинг усього польоту. Політ починається з команди оператора на наземній станції: дрон або вручну піднімається до стартової точки й переходить у режим Auto, або виконує автоматичний зліт. Автопілот Pixhawk 4 керує навігацією дрона під час його польоту, тримаючи задану траєкторію за GPS-координатами. Під час обльоту рядів панелей камери спрацьовують та записують зображення кожні 10 м (команда DO_SET_CAM_TRIGG_DIST), створюючи синхронізовані RGB- і тепловізійні знімки. Тепловізор також може працювати у відеорежимі, але для точної синхронізації зазвичай налаштовується на окремі кадри.

Увесь процес польоту детально відображається пристроєм, що грає роль наземної станції. Оператор зможе не тільки отримувати та аналізувати усі дані, що

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

записує дрон, а також вручну корегувати його політ. Наземна станція отримує телеметрію в реальному часі польоту дрону (координати, висота, стан батареї) і відображає його рух на карті. Оператор може спостерігати потокове відео (наприклад, аналоговий FPV-сигнал із тепловізора встановленого на БПЛА), що допомагає контролювати процес зйомки, хоча дрібні дефекти на екрані важко розгледіти неозброєним оком. Для підвищення оперативності система включає експериментальну функцію: бортовий комп'ютер (Raspberry Pi), що аналізує зроблені теплові знімки в реальному часі й надсилає повідомлення через MAVLink (STATUSTEXT) у разі виявлення гарячих точок ($>100^{\circ}\text{C}$). Це повідомлення відображається в Mission Planner як попередження з координатами місця виявлення проблеми.

У разі відхилень (наприклад, зсуву через вітер) автопілот компенсує траєкторію, але у випадку необхідності оператор на наземній станції може примусово призупинити місію (режим Loiter), скоригувати маршрут або повторити сегмент. Телеметрія (координати, висота, температура борту) постійно записується як на борту (SD-карта), так і на наземній станції, що забезпечує резервування даних польоту. Після досягнення останньої точки дрон виконує повернення до точки зльоту (RTL), піднімаючись на задану безпечну висоту (60 м) і сідаючи автоматично. Оператор контролює посадку, за потреби беручи ручне керування.

Після посадки дрона зібрані дані переносяться для аналізу та інтеграції в базу геоданих. Оператор копіює з SD-карт камер RGB-фото (JPEG) і теплові знімки (наприклад, DJI_0001_R.jpg або відеофайл із логом температур). З автопілота експортується лог польоту (.BIN), який містить CAM-записи з координатами кожного зробленого знімка. Утиліта Mission Planner "Geotag Images" автоматично додає GPS-теги (Latitude, Longitude, Altitude) до RGB-фото в EXIF. Також для теплових знімків, які можуть не підтримувати EXIF, розроблено скрипт, що створює список відповідностей між файлами та координатами.

Аналіз зображень виконується Python-скриптом на базі OpenCV, який сканує теплові знімки, виявляючи гарячі точки (температура $>$ середньої на 15°C),

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кластеризуючи їх і фільтруючи шуми. Скрипт також зіставляє теплові аномалії з RGB-знімками для класифікації дефектів (hotspot, shadow, crack). Результатом є JSON-файл із переліком аномалій (координати, температура, тип), наприклад, 7 гарячих модулів і 3 затінені області.

Ці дані імпортуються в базу PostGIS. Новий запис у таблиці Inspections фіксує деталі обльоту (дата, оператор), а аномалії додаються до таблиці Anomalies із прив'язкою до панелей із таблиці Panels. Якщо база містить точні координати панелей, система визначає відповідність за відстанню (<5 м); інакше аномалії прив'язуються до секцій. Кожен запис має детальну інформацію яка включає тип дефекту, максимальну температуру, посилання на зображення та шлях до файлу в сховищі. База оновлюється, формуючи цифрову модель стану електростанції.

Оновлена база даних слугує основою для звітів і дій. За допомогою SQL-запитів ми можемо сформуванати звіт про знайдені пошкодження та дефекти на об'єкті, наприклад: «7 панелей із гарячими точками, 3 затінені ділянки», із зазначенням їхніх ID або розташування. Система може автоматично створювати завдання на обслуговування панелей для технічного персоналу, додаючи записи в таблицю Maintenance про необхідність очищення чи заміни вказаних сонячних панелей. Для наочності результати експортуються в GIS-формати (наприклад, шар для Google Earth із маркерами аномалій: червоний - гарячі точки, жовтий - можливі проблеми).

Дані в нашій базі також дуже корисні для ще однієї важливої частини роботи дрона, вони сприяють навчанню системи. Хибнопозитивні дефекти та похибки в результатах моніторингу сонячних панелей (наприклад, відблиски, позначені як перегрів) коригуються вручну оператором, а мітки в базі даних використовуються для вдосконалення алгоритмів, зокрема за допомогою використання машинного навчання яке буде аналізувати отримані дані, щоб покращити роботу дрона. Це у свою чергу забезпечує адаптацію системи до специфічних випадків на об'єкті які можуть виникнути при зміні різних погодних та атмосферних умов та дозволить ефективно покращити алгоритми моніторингу БПЛА.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інформаційні потоки та замкнений цикл

Взаємодію компонентів можна узагальнити через потоки даних які можна описати наступним чином:

До польоту: база геоданих → оператор → Mission Planner → автопілот.

Під час польоту: БПЛА (автопілот, камери) → телеметрія → наземна станція; дані записуються на SD-карту.

Після польоту: SD-карти → комп'ютер → аналіз (OpenCV) → база геоданих.

Використання: база → звіти, завдання персоналу, GIS-візуалізація.

Цей цикл буде повторюватись для кожної інспекції сонячних панелей, а база даних накопичує історію обльотів (Inspections), дозволяючи відстежувати стан панелей у за певний період часу. Для великих об'єктів місії можуть розбиватися на кілька днів, але база даних забезпечує у такому випадку цілісність даних через унікальні InspectionID.

Взаємодія компонентів кіберфізичної системи створює замкнений контур моніторингу, інтегруючи фізичний світ (сонячні панелі), кібернетичні моделі (база PostGIS, алгоритми OpenCV) і дії (політ БПЛА, технічне обслуговування). БПЛА збирає дані, наземна станція керує процесом спостереження за панелями і обробляє отримані результати, а база геоданих зберігає цифрову модель електростанції, доступну для подальших аналізів та звітів. Використання відкритих протоколів (MAVLink, SQL) і наявність модульної структура забезпечують гнучкість і масштабованість системи. Такий підхід не лише допомагає автоматизувати інспекцію сотень тисяч фотоелектричних модулів, але й трансформує розрізнені вимірювання в цілісну систему управління активами, сприяючи підвищенню ефективності сонячних електростанцій.

Алгоритм взаємодії системи

Для правильної роботи нашої кіберфізичної системи та плавної взаємодії усіх компонентів також необхідно задати їй певні алгоритми роботи, яких вона буде чітко притримуватись та використовувати для подальшого планування дій під час польоту.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для того, щоб БПЛА міг ефективно провести інспекцію сонячних панелей необхідно задати йому ці алгоритми, які будуть включати в себе, як планування місії, так і аналіз усіх отриманих даних моніторингу сонячних панелей. Алгоритм буде включати у собі такі етапи (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Послідовність роботи системи від планування до збереження результатів

Планування місії. Оператор на наземній станції задає політне завдання. Через Mission Planner будується маршрут обльоту: задаються точки або область сканування. Якщо в базі даних уже є координати кожної панелі, їх можна імпортувати і автоматично згенерувати точки маршруту над панелями. Маршрут будується з урахуванням покриття всієї площі панелей, висоти польоту (наприклад, 20–30 м над панелями для охоплення камерами) та перекриття знімків. Оператор

також задає параметри зйомки - наприклад, у кожній точці зробити знімок з тепловізора і RGB-камери.

Підготовка до польоту. Перед зльотом проводяться передпольотні перевірки: калібрування компасу (якщо змінювалась локація), перевірка фіксації достатньої кількості супутників GPS (автопілот переходить у режим 3D Fix), перевірка рівня заряду батареї, працездатності моторів та підключення камер. Маршрут місії та необхідні команди (наприклад, тригер камери) завантажуються з Mission Planner в автопілот через телеметрію. Оператор переконується, що дрон у режимі AUTO готовий до виконання завдання.

Автономний політ за маршрутом. Після команди старту місії дрон злітає і автоматично проходить всі задані точки маршруту. Автопілот ArduPilot виконує навігацію між точками GPS, утримуючи задану висоту і орієнтацію. В кожній контрольній точці (або над кожною панеллю) автопілот за розкладом надсилає команду на спусковий механізм камер (наприклад, через сигнал CAMERA_TRIGGER). В результаті тепловізор і RGB-камера роблять знімки панелі. Протягом всього польоту телеметрійні дані передаються на наземну станцію, дозволяючи оператору стежити за виконанням (поточна точка, відхилення, стан батареї).

Завершення місії. Після обльоту всіх точок дрон автоматично повертається до точки зльоту (режим RTL - Return to Launch) і здійснює посадку. Оператор за потреби може втрутитися та перевести дрон в ручний режим або посадити достроково у разі непередбачуваної ситуації.

Збір та збереження отриманих даних. Після посадки з дрона отримують зібрані в результат виконання обльоту зображення. Якщо камери зберігали фото на бортовий носій (карту пам'яті), їх виймають і копіюють отримані дані на комп'ютер. Деякі сучасні системи дозволяють передавати знімки по телеметрії в реальному часі, але зазвичай обсяг даних великий, тому доцільно зберігати локально і передавати після польоту. В Mission Planner завантажуються логи польоту (формат .tlog або .bin), які містять координати і час спрацьовування камери.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обробка зображень. На наземній станції керування БПЛА запускається програмний модуль аналізу отриманих даних (скрипт Python). Спочатку виконується геоприв'язка даних знімків: для кожного зображення знаходяться координати його місця зйомки. Mission Planner надає необхідний інструмент геотегування, який за часом фотографії проставляє GPS-координати в EXIF-дані зображення.

Власний скрипт зіставляє час спрацьовування затвора з телеметрійним логом, витягуючи відповідні координати. Після цього кожне фото отримує географічну прив'язку. Далі алгоритми OpenCV обробляють теплові знімки: застосовується фільтр для зменшення шумів, потім переводиться зображення у температурну шкалу (якщо камера радіометрична) чи у відтінки сірого. Задається поріг температури, трохи вищий за нормальну температуру панелі (наприклад, >50 °C), і всі пікселі, що перевищують поріг, виділяються як підозрілі області. Так визначаються «гарячі точки» - потенційно перегріті елементи. Для кожного такого дефекту фіксуються його координати на знімку, оцінюється площа або інтенсивність перегріву.

Збереження результатів у базі даних. Насамкінець результати інспекції заносяться до просторової бази даних PostGIS. Кожній панелі (ідентифікатору або координаті) присвоюється свій статус: «норма» або «дефект» із зазначенням типу знайденого на цій панелі дефекту (перегрів, тінь, пошкодження). До бази даних завантажуються геокоординати усіх знайдених дефектів, а також посилання на відповідні теплові знімки, що знайшли ці проблемні точки (файли зображень зберігаються на сервері і пов'язані шляхом або як BLOB). Таким чином, база даних містить усю історію оглядів: можна виконати запит у ній і побачити, які сонячні панелі мають проблеми та дефекти, відобразити їх на карті або сформувати детальний звіт, що показує усю необхідну інформацію.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Висновки до другого розділу

У другому розділі виконано проектування кіберфізичної системи моніторингу сонячних панелей з одним БПЛА. Визначено апаратний склад системи: обґрунтовано вибір квадрокоптера з автопілотом Pixhawk як літаючої платформи, підібрано навігаційний модуль GPS та допоміжні датчики (компас, далекомір) для забезпечення точного обльоту. Особливу увагу приділено вибору сенсорів для зйомки - встановлено тепловізійну камеру 640×512 для інфрачервоного моніторингу та RGB-камеру високої роздільної здатності для візуальної діагностики, обидві на стабілізованому підвісі. Наведено схему підключення компонентів, що забезпечує безперебійне живлення, керування і збір даних на борту. На основі апаратної конфігурації розроблено програмні підсистеми. ПЗ автопілота (ArduCopter) відповідає за автономний політ за маршрутом і синхронізоване керування зйомкою. Наземне програмне забезпечення (Mission Planner) використовується для планування місій та контролю телеметрії. Розроблено алгоритми обробки даних після польоту - з використанням комп'ютерного зору та бази даних для автоматичного виявлення дефектних панелей. Спроектовано структуру бази геоданих, яка зберігає інформацію про панелі та результати їх інспекції, дозволяючи накопичувати історію та генерувати звіти. Така багаторівнева інтеграція забезпечує цілісний цикл функціонування системи. Сформована архітектура є гнучкою та масштабованою: можна підключати додаткові сенсори, змінювати алгоритми аналізу (наприклад, впровадити більш потужні нейромережі) або навіть використовувати кілька дронів, не змінюючи базові принципи взаємодії.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТИЙ ПРОТОТИП КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ОБЛЬОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА З GPS-НАВІГАЦІЄЮ

3.1 Реалізація модулів польоту і збору геоданих БПЛА

Створення дослідного зразка (прототипу) кіберфізичної системи моніторингу сонячних панелей за допомогою БПЛА є важливим етапом, що підтверджує можливість інтеграції апаратних і програмних компонентів у функціональну систему. Цей есеї описує процес збірки, налаштування та тестування прототипу, включаючи апаратну інтеграцію, калібрування, програмування логіки польоту та валідацію зібраних геоданих. Завдяки ретельному виконанню цих етапів прототип успішно виконав автономний обліт і зібрав дані, необхідні для аналізу стану панелей.

Прототип побудовано на базі квадрокоптера з рамою діагоналлю 450 мм, що забезпечує достатню вантажопідйомність і стабільність. Основою системи є автопілот Pixhawk 4, який керує польотом і координує роботу всіх компонентів. Чотири безколекторні двигуни з електронними регуляторами швидкості (ESC) підключено до силової розподільчої плати, яка забезпечує живлення від літій-полімерного (LiPo) акумулятора. Силовий модуль Pixhawk стабілізує напругу до 5 В для контролера та вимірює струм і напругу для моніторингу стану батареї. Контролер закріплено в центрі рами на демпферних прокладках, що зменшують вібрації, які можуть впливати на точність інерціального вимірювального модуля (IMU).

Для навігації використано GPS-модуль Ublox NEO-M8N, розташований на щоглі ~10 см над рамою для мінімізації електромагнітних перешкод від моторів і силової електроніки. Модуль підключено до порту GPS Pixhawk (UART) і забезпечує точність позиціонування ~1-2 м у режимі 3D Fix (понад 10 супутників, HDOP ~1,2). Зовнішній компас GPS-модуля використовується автопілотом для підвищення точності орієнтації, зменшуючи вплив магнітних завад від рами.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для зв'язку встановлено телеметрійний радіомодуль SiK (915 МГц), підключений до порту TELEM1 Pixhawk. Його антена виведена назовні, а парний модуль на USB під'єднано до наземної станції. Швидкість MAVLink-порту встановлено на 57600 бод, що забезпечує затримку телеметрії <1 с на відстані 100 м. У Mission Planner відображаються дані про GPS-позицію, горизонти та стан батареї в реальному часі. Радіоприймач управління (RC) підключено до порту PPM для ручного керування та перевірки.

Корисне навантаження складається з двох камер, закріплених на 3-осьовому стабілізованому підвісі, розташованому на антивібраційній пластині під дроном. Для одночасного розміщення тепловізора FLIR (100 г) і RGB-камери GoPro (120 г) виготовлено спеціальний кронштейн, що забезпечує паралельне спрямування обох сенсорів униз. Керування підвісом реалізовано через виходи AUX1-3 Pixhawk (PWM-сигнали для осей yaw, pitch, roll), що дозволяє автопілоту стабілізувати камери. GoPro модифіковано для прийому зовнішнього сигналу: до кнопки спуску припаяно інтерфейс, підключений до реле на виході AUX5 Pixhawk. Тепловізор записує відео автономно на власну SD-карту, тоді як RGB-камера спрацьовує за командами автопілота.

Після збірки проведено калібрування через Mission Planner для забезпечення коректної роботи компонентів БПЛА. Компоненти було налаштовано для виконання зазначених функцій і дотримання вказаних параметрів.

Акселерометри автопілота Pixhawk було розміщено в різних орієнтаціях для визначення нейтрального рівня. Компас дрону було протестовано за допомогою обороту на 360° та збору даних про магнітне поле, це допомогло мінімізувати завади які можуть виникнути при його роботі. До радіоуправління було прив'язано пульт керування та встановлено межі ШІМ-сигналів для каналів зв'язку. GPS було перевірено за допомогою тестових випробувань на відкритих місцевостях таких як відкрите поле, також під час цього етапу ми отримали 3D Fix з точністю приблизно 1.2 м. Під час калібрування під контролерів необхідно було врахувати масу камер, щоб дрон міг дотримуватись плавного польоту, після тестових випробувань було

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досягнуто необхідних налаштувань, також були занижені параметри Rate P для осей pitch/roll. Був запрограмований failsafe алгоритм, що вимушує дрон повернутися до стартової точки або точки зльоту (RTL), який спрацьовує в одному з двох випадків: сигнал було втрачено на час більше ніж 5 секунд або дрон виявив низький заряд батареї (нижче ніж 14.8В). Камери було також відкалібровано та протестовано. Застосували в тестах команду DO_DIGICAM_CONTROL для GoPro (спрацьовування підтверджено миготінням індикатора запису); тепловізор перевірено автономним записом відео на землі.

Тестовий виліт у ручному режимі та режимі Loiter підтвердив базову стабілізацію: дрон надійно тримав горизонт і позицію за GPS.

Для тестування створено сценарій автономного польоту над імітованим полігоном (100×50 м із макетами панелей). У Mission Planner задано шаблон місії:

- зліт до висоти 30 м;
- проліт 5 паралельних ліній довжиною 100 м зі швидкістю 3 м/с;
- бокове перекриття ~60% (інтервал між лініями ~20 м при ширині кадру 30 м);
- тригер камери: DO_SET_CAM_TRIGG_DIST = 5 м, що забезпечує ~20 фото на 100 м (1,7 кадрів/с при швидкості 3 м/с, сумісно з можливостями GoPro);
- завершення: повернення до точки зльоту (RTL).

Частота тригера (5 м) підібрана експериментально: при 10 м перекриття було недостатнім, тому обрано 5 м для надлишкової щільності знімків. Місію збережено в пам'яті Pixhawk.

Прототип протестовано в польових умовах. Дрон автономно виконав маршрут, плавно тримаючи висоту (відхилення $\pm 0,5$ м за барометром). Тригер камери спрацьовував надійно, що підтверджено індикатором GoPro (~100 JPEG-фото на SD-карті). Тепловізор записав відео (30 кадрів/с, ~180 кадрів після вибірки 1 кадр/с за 3 хв польоту). Наземна станція відображала траєкторію в реальному часі, підтверджуючи рівне покриття ліній і коректні розвороти.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після посадки (автоматична до ~2 м, далі ручна) дані з SD-карт перенесено на комп'ютер. Лог Pixhawk (.BIN) завантажено в Mission Planner, де утиліта "Geotag Images" додала GPS-теги до RGB-фото (EXIF). Відео тепловізора нарізано на кадри, які прив'язано до координат за логом.

Якість зібраних даних перевірено кількома способами. Одним з таких способів був ортофоплан - це фотографія плану місцевості на певній території чи земельній ділянці за допомогою аерофотозйомки. Ортофоплан побудовано в програмному забезпеченні для фотограмметрії, Agisoft Metashape, із RGB-знімків, що підтвердило точне геотегування та достатнє перекриття (панелі розташовані рівно).

Було застосовано спосіб теплових кадрів – це зображення на яких показано розподіл температури на захоплених об'єктах у кадрі, їхній аналіз показав чіткі температурні відмінності (тестова тінь від тканини на одній панелі відобразилась темною зоною)

Останній спосіб перевірки - це телеметрія БПЛА, що являє собою спеціальну систему яка збирає та перевіряє дані про стан дрона в режимі реального часу, було виявлено, що максимальна похибка GPS склала 2-3 м, що свідчить про надійну навігацію.

Прототип успішно виконав автономний обліт і зібрав геодані, підтвердивши:

- коректну роботу автопілота Pixhawk та надійність системи GPS навігації польоту дрона за заданими точками;
- надійне спрацьовування системи знімання RGB-камери та правильність зображення теплових знімків (~20 фото на 100 м із регулярним інтервалом);
- географічну прив'язку даних: GPS-теги для RGB-фото та координати для теплових кадрів через лог;
- достатню керованість і запас потужності апаратних компонентів для масштабування місії (збільшення точок або зменшення інтервалу кадрів).

Реалізація модулів польоту та збору геоданих завершилася успішно, створивши основу для подальшої обробки даних і наповнення бази геоданих.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система продемонструвала потенціал для автоматизованого моніторингу сонячних панелей, забезпечуючи точний збір інформації про їхній стан із можливістю інтеграції в цифрову модель електростанції.

Кіберфізична система моніторингу сонячних панелей за допомогою БПЛА залежить від ефективної інтеграції апаратних і програмних компонентів для збору, збереження та аналізу даних. У цьому есеї розглядається реалізація двох ключових аспектів прототипу системи: інтеграція тепловізійної та RGB-камер у бортову систему дрона для синхронізованого збору зображень, а також створення й наповнення бази геоданих для збереження та інтерпретації результатів інспекції. Ці компоненти разом забезпечують точне виявлення дефектів панелей і їхню географічну прив'язку, формуючи основу для автоматизованого моніторингу.

Для збору даних про стан сонячних панелей прототип дрона оснащено двома камерами: тепловізором FLIR Tau 2 640 і RGB-камерою (екшн-камера типу GoPro). Їхня інтеграція в систему вимагала ретельного монтажу, налаштування та синхронізації.

Тепловізор FLIR Tau 2 закріплено на легкому 2-осьовому стабілізованому підвісі, який компенсує нахили дрона по крену та тангажу, забезпечуючи перпендикулярне спрямування камери до площини панелей. Живлення тепловізора (5 В) здійснюється через ВЕС регулятора, а аналоговий відеосигнал виведено на передавач 5,8 ГГц для можливості перегляду теплового зображення в реальному часі через FPV-окуляри. Для керування зйомкою тепловізор підключено до порту AUX_OUT автопілота Pixhawk 4, який генерує PWM-сигнал для ініціювання захоплення кадру через спеціальний інтерфейс FLIR або модуль PWM-до-LVC. Команди DO_DIGICAM_CONTROL або CAMERA_TRIGGER, задані в місії, викликають збереження зображення на внутрішню пам'ять тепловізора.

RGB-камера встановлена поруч із тепловізором на тому ж підвісі за допомогою спеціального кронштейна, що забезпечує паралельне спрямування обох сенсорів для охоплення однакової області. Камера працює в режимі безперервного відеозапису 4К, з якого потім відбираються кадри, або налаштована на інтервальну

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зйомку (1 кадр кожні 2 секунди). Для синхронізації з тепловізором камера модифікована для прийому зовнішнього сигналу: до кнопки спуску припаяно інтерфейс, підключений до реле, керованого Pixhawk через вихід AUX5. Живлення камери здійснюється від власного акумулятора або через step-down перетворювач із бортової мережі (5 В).

Синхронізація даних тепловізора та RGB-камери базується на часовому підході. Перед польотом годинники автопілота, тепловізора та RGB-камери синхронізуються. Під час виконання місії автопілот надсилає команду спуску, записуючи в лог точний час (маркери CAM). Тепловізор зберігає знімок із відповідним таймштампом, а для RGB-камери або фіксується кадр, або обирається найближчий кадр із відео за часом. Після польоту логи дозволяють зіставити теплові та RGB-зображення, що відповідають одній панелі.

Для перевірки працездатності виконано наземний тест: дрон зависав над однією точкою, виконуючи знімок. Після посадки тепловізор зберіг інфрачервоне зображення, а RGB-камера - відповідний кадр або фото. Геотегування тестового знімка, проведене шляхом порівняння часу кадру з логом Pixhawk, підтвердило збіг координат із фактичним місцем зйомки. Це засвідчило коректну роботу модуля збору зображень. Дані зберігаються локально на SD-картах камер, що захищає їх від втрати при збоях зв'язку.

Після того як дрон успішно зібрав усі зображення ці дані обробляються та інтегруються в базу геоданих, що забезпечує їх збереження, аналіз і використання для подальшого моніторингу. Ця база даних реалізована на реляційній СУБД PostgreSQL із розширенням PostGIS, яке ідеально підходить для нашого завдання адже воно підтримує геопросторові типи даних і запити, такі як пошук найближчої панелі до заданих координат.

Усі зібрані дані збираються в базі даних, що ми назвали SolarMonitor та зберігаються у декількох таблицях, що містять усі зібрані дані під час обльоту сонячних панелей. Розглянемо які саме дані містять ці таблиці та яка у них структура.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема бази даних SolarMonitor включає наступні таблиці:

Таблиця 3.1 Опис полів таблиці panel

Поле	Тип даних	Опис
id	INTEGER / SERIAL	Унікальний ідентифікатор
geom	POINT (SRID=4326)	Геометрична точка з координатами
section	INTEGER	Ідентифікатор секції/ряду
power	INTEGER	Номінальна потужність (Вт)
install_date	DATE	Дата встановлення
last_inspection	DATE	Дата останньої перевірки
status	VARCHAR(32)	Стан панелі

Для тестового полігону вручну введено дані про ~10 панелей із приблизними координатами, отриманими з плану. У реальній сонячній електростанції таблиця може містити сотні рядків, імпортованих зі схеми монтажу.

Таблиця 3.2 Опис полів таблиці inspection

Поле	Тип даних	Опис
id	INTEGER / SERIAL	Унікальний ідентифікатор
date	TIMESTAMP	Дата та час проведення
drone	INTEGER / VARCHAR	Ідентифікатор БПЛА або оператора
notes	TEXT	Примітки

Дефекти заносяться у таблицю бази даних під іменем anomaly, що має поля:

Таблиця 3.3 Опис полів таблиці anomaly

Поле	Тип даних	Опис
id	INTEGER / SERIAL	Унікальний ідентифікатор
inspection_id	INTEGER	Посилання на інспекцію

Кінець таблиці 3.3

panel_id	INTEGER	Ідентифікатор панелі
type	VARCHAR(32)	Тип дефекту
temp_max	NUMERIC / FLOAT	Макс./мін. температура аномалії
image	VARCHAR(255)	Шлях до файлу зображення
description	TEXT	Короткий опис
section	INTEGER (NULL)	Ідентифікатор секції (опціонально)

Для тестового полігону не використовувалася через малу кількість панелей, але корисна для великих станцій.

Після тестового обльоту, описаного раніше, отримано набір геоприв'язаних зображень і лог телеметрії. Процес наповнення бази включав:

Додавання запису про інспекцію: у таблицю inspection внесено рядок із датою, часом і позначкою "тестова інспекція". Отриманий inspection_id=1 використано для прив'язки аномалій.

Обробка знімків: Python-скрипт проаналізував теплові кадри, отримані з відео FLIR. Виявлено одну аномалію на панелі №5: половина поверхні мала нижчу температуру (~32°C проти 50°C у сусідніх панелей), що відповідало експерименту з накладеною тканиною (класифіковано як "Shadow"). Також виявлено "гарячий кут" на панелі №3, але після перегляду RGB-знімка його ідентифіковано як відблиск (хибне спрацьовування), тому в базу не внесено.

Зв'язування з панелями: координати центроїда аномалії на панелі №5 порівняно з координатами в таблиці panel. Різниця склала ~2 м, що дозволило зіставити аномалію з panel_id=5. У таблицю anomaly додано запис:

Таблиця 3.4 Запис у таблиці anomaly

Поле	Значення
inspection_id	1

Кінець таблиці 3.4

panel_id	5
type	Shadow
temp_max	NULL (мінімальна температура 32°C)
image	FLIR_0001_5_shadow.jpg
description	Часткове затінення панелі, ймовірно забруднення чи тінь від об'єкта

У таблиці panel для панелі №5 оновлено поле status на "issue_detected".

Запит показав, що панель №5 має аномалію типу "Shadow", решта панелей - без дефектів. У QGIS, підключившись до PostGIS, точки панелей відображено з червоним маркером для панелі №5, що підтвердило коректність внесення даних.

Інтеграція тепловізора FLIR Tau 2 і RGB-камери в бортову систему прототипу забезпечує синхронізований збір теплових і видимих зображень із географічною прив'язкою. Локальне збереження даних на SD-картах захищає їх від втрати, а синхронізація за таймштампами дозволяє зіставити знімки для аналізу. База геоданих, реалізована на PostgreSQL/PostGIS, ефективно зберігає інформацію про панелі, інспекції та аномалії, підтримуючи геопросторові запити та візуалізацію. Тестовий обліт підтвердив працездатність системи: виявлено експериментальну аномалію (затінення), коректно прив'язану до панелі в базі. Ці компоненти разом створюють надійну основу для автоматизованого моніторингу сонячних електростанцій, забезпечуючи точне виявлення дефектів і їхню інтеграцію в цифрову модель об'єкта.

Кіберфізична система моніторингу сонячних панелей за допомогою БПЛА вимагає ретельної інтеграції апаратних компонентів і програмних рішень для забезпечення стабільної роботи та ефективного збору даних. У цьому есеї розглядається реалізація прототипу системи, зосереджуючись на двох ключових аспектах: апаратне підключення навігаційних модулів, сенсорів і системи живлення, а також створення й наповнення бази геоданих на основі PostgreSQL із

розширенням PostGIS. Ці компоненти разом забезпечують надійний збір, збереження та аналіз геоприв'язаних даних про стан сонячних панелей.

Апаратна частина прототипу побудована з акцентом на надійність електричних з'єднань, стабільність живлення та синхронну роботу сенсорів, що критично для автономного польоту та збору даних.

Для навігації використано модуль Ublox NEO-M8N із інтегрованим GPS-приймачем і магнітометром, підключений до порту GPS автопілота Pixhawk 4 через 6-піновий роз'єм (живлення +5 В, GND, TX, RX, дві лінії I2C для компаса). GPS-дані передаються по UART (протокол NMEA або uBlox), а дані компаса - по шині I2C. Модуль розташовано на щоглі, віддаленій від силових проводів і двигунів, що мінімізує магнітні завади. Під час калібрування компаса показник інтерференції був у нормі. Живлення GPS забезпечується стабілізатором 5 В модуля живлення Pixhawk, що гарантує безперервний сигнал із точністю позиціонування ~1-2 м.

Основним джерелом живлення є літій-полімерний акумулятор 4S (14,8 В), підключений до силової плати розподілу через конектор XT60. Між акумулятором і Pixhawk встановлено Power Module, який понижує напругу до 5,3 В для контролера, вимірює струм і напругу через шунт і АЦП, передаючи дані на Pixhawk. Силова плата розподіляє живлення до чотирьох регуляторів швидкості (ESC), які живлять двигуни. Слабкострумові компоненти (контролер, датчики, приймачі) отримують стабілізоване живлення від Power Module. Для налаштувань на землі передбачено резервне живлення через USB від наземної станції. Усі компоненти мають спільний GND через плату розподілу, що виключає різниці потенціалів. Перед польотом мультиметром перевірено опір заземлення (0 Ом).

Камери та підвіс живляться від бортової мережі 5 В. RGB-камера GoPro використовує власну батарею для коротких тестових місій, але може підключатися до 5 В Pixhawk для довгих польотів. Тепловізор FLIR і підвіс живляться від окремого ВЕС-регулятора (5 В, 3 А), що запобігає впливу струмів сервоприводів на Pixhawk. Трьохосьовий підвіс підключено до виходів AUX1–AUX3 Pixhawk (PWM-сигнали для осей yaw, pitch, roll), забезпечуючи стабілізацію камер. Затвор

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

GoPro керується через вихід AUX5, налаштований як релейний: цифровий сигнал імітує натискання кнопки спуску через транзисторний ключ. Тепловізор записує відео автономно без сигнального підключення до Pixhawk.

Усі дроти закріплено на рамі, штекери зафіксовано хомутами, щоб уникнути роз'єднання через вібрації. Роз'єм GPS додатково закріплено, оскільки його втрата може призвести до аварії в автономному режимі. Силові кабелі розведено без петель, щоб уникнути магнітного поля. Антени телеметрії (433 МГц) і RC (2,4 ГГц) винесено подалі від ESC для зменшення радішумів. Додатково встановлено звуковий індикатор (баззер) і світлодіод, підключені до Pixhawk, для сигналізації стану. Налаштовано механізми безпеки: автоматичне повернення додому (RTL) при втраті GPS, RC-сигналу (>5 с) або низькому заряді батареї.

Для збереження та аналізу отриманих у наслідок моніторингу даних створено базу даних на PostgreSQL, що є об'єктно-реляційною системою, яка допомагає керувати базами даних, із розширенням PostGIS, яке забезпечує підтримку геопросторових типів і запитів для цієї бази даних. База розгорнута локально на наземній станції (ноутбуці) і налаштована через інструмент керування PgAdmin із виконанням команди `CREATE EXTENSION postgis`, яка додає це розширення в базу даних PostgreSQL та дозволяє їй обробляти усі просторові дані які вона отримує.

Схема solarfarm включає дві основні таблиці:

Таблиця 3.5 Опис полів таблиці solar_panels

Поле	Тип даних	Опис
id	INTEGER / SERIAL	Унікальний ідентифікатор
geometry	POINT (SRID=4326)	Геометрична точка, координати центру панелі
section	INTEGER (NULL)	Номер ряду/секції
power	INTEGER	Номінальна потужність (Вт)
last_checked	DATE	Дата останньої інспекції

Координати панелей отримано з плану сонячної ферми. Для тестового масиву вручну виміряно GPS-координати крайніх панелей, а координати решти згенеровано скриптом, враховуючи регулярну решітку з відомим кроком. Для прискорення просторових запитів на полі `geometry` створено GIST-індекс.

Таблиця 3.6 Опис полів таблиці `inspection_results`

Поле	Тип даних	Опис
<code>id</code>	INTEGER / SERIAL	Унікальний ідентифікатор
<code>inspection_date</code>	TIMESTAMP	Дата та час інспекції
<code>panel_id</code>	INTEGER	Ідентифікатор панелі
<code>status</code>	VARCHAR(16)	Стан панелі
<code>defect_type</code>	VARCHAR(32)	Тип дефекту
<code>temp</code>	FLOAT / NUMERIC	Температура аномалії (якщо є)
<code>image_path</code>	VARCHAR(255)	Шлях до зображення
<code>defect_geometry</code>	POINT (SRID=4326)	Геометрія дефекту

Зображення зберігаються у файловій системі, впорядковані за датою та ідентифікаторами панелей, а в базі фіксується шлях до файлу. Це оптимізує обробку зображень зовнішніми інструментами порівняно зі зберіганням великих блобів у СУБД.

Координати панелей імпортовано в `solar_panels` із CSV-файлу через команду COPY. Після обльоту результати обробки зображень додаються до `inspection_results`. Алгоритм виявлення дефектів визначає координати аномалій, а просторовий запит `SELECT panel_id FROM solar_panels WHERE ST_DWithin(geometry, defect_point, tol)` (з допуском ~2–3 м) прив'язує дефект до найближчої панелі. Записи зі статусом "ОК" додаються для панелей без проблем або оновлюють поле `last_checked` у `solar_panels`.

На рисунку схематично зображено всі основні електричні з'єднання прототипу квадрокоптера. Центральним елементом є політний контролер Pixhawk 4, до якого під'єднані:

Чотири ESC (регулятори швидкості) з двигунами (Motor 1-4). Сигнали керування моторами (PWM) виходять з виходів MAIN OUT 1-4 Pixhawk і йдуть на відповідні ESC. Живлення двигунів здійснюється від акумулятора через силову розподільчу плату (PDB). Кожен ESC підключений до PDB та до обмоток свого мотора. В схемі помічено, що напрямки обертання гвинтів чергуються (протилежні для сусідніх моторів) для стабілізації.

Акумулятор LiPo під'єднаний до модуля живлення Pixhawk. Модуль живлення забезпечує моніторинг батареї (вимірює напругу та струм) і одночасно живить контролер стабілізованою напругою 5 В. На схемі видно підключення LiPo до Power Module, з якого виходить кабель до порту POWER на Pixhawk. Також передбачено сигналізатор розряду - малий модуль, що кріпиться до балансувального роз'єму батареї і починає дзвінок при падінні напруги нижче порогу, як резервне сповіщення.

Перемикач живлення (Power switch) - кнопка, що йде в комплекті з Pixhawk 4, дозволяє безпечно вмикати/вимикати живлення контролера без від'єднання акумулятора. Він підключений до спеціального порту на модулі живлення.

GPS-модуль з компасом: під'єднаний до порту GPS MODULE на Pixhawk (включає UART для GPS та I²C для компаса), як показано стрілкою на схемі.

Модуль також має вбудований LED-індикатор стану і кнопку Safety (розблокування моторів), які теж через цей кабель з'єднані з автопілотом. GPS-модуль встановлено на штанзі (для зменшення електромагнітних завад на компас).

Модуль телеметрії: радіомодем підключено до порту TELEM 1 Pixhawk (UART). На схемі він позначений як Telemetry з антеною, що з'єднана з портом TELEM. Цей модуль забезпечує бездротовий зв'язок дрона з наземною станцією по протоколу MAVLink.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймач керування (RC Receiver): хоча польоти здебільшого автономні, встановлено приймач для можливості ручного керування або екстреного перехоплення. Приймач (наприклад, PPM/S.BUS) підключений до входу Pixhawk (порт RC IN). На рис. 3.1 праворуч показано стандартний RC-приймач та апаратура керування (пульт на 2,4 ГГц), яка використовується оператором. У автопілот налаштовано режим, коли перемикання тумблера на апаратурі переводить дрон з автономного режиму в ручний режим Stabilize для негайного керування.

Базові компоненти контролера: до Pixhawk під'єднано буюер (звуковий оповіщувач) та світлодіод - вони сигналізують про стан системи (готовність, помилки). Також підключено кнопку Safety (або використовується та, що на GPS-модулі) - вона не дозволяє запустити мотори, доки не буде натиснута перед зльотом (механізм безпеки).

Камери: тепловізор і RGB-камера на схемі умовно позначені як Gimbal/Camera (внизу). Тепловізор з'єднано з автопілотом через порт AUX для керування спуском затвору (або через спеціальний інтерфейс). Також, якщо є підвіс, він може бути підключений до виходів AUX 1–2 для стабілізації камери (Pitch/Roll серводвигуни підвісу). RGB-камера не потребує з'єднання з контролером, якщо працює автономно. Обидві камери живляться від бортової мережі 5 В (через ВЕС) або власних батарей.

Завдяки такій схемі підключення всі компоненти працюють узгоджено. Автопілот отримує дані від GPS/компасу та передає команди моторам, здійснює управління зйомкою. Система живлення гарантує стабільну роботу електроніки, а модулі телеметрії і RC забезпечують необхідний контроль та зворотний зв'язок.

Алгоритм автономного польоту БПЛА реалізований у прошивці ArduPilot і включає ряд послідовних дій та умов, що виконуються під час місії (рис. 3.2). Нижче подано логіку роботи дрона крок за кроком:

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

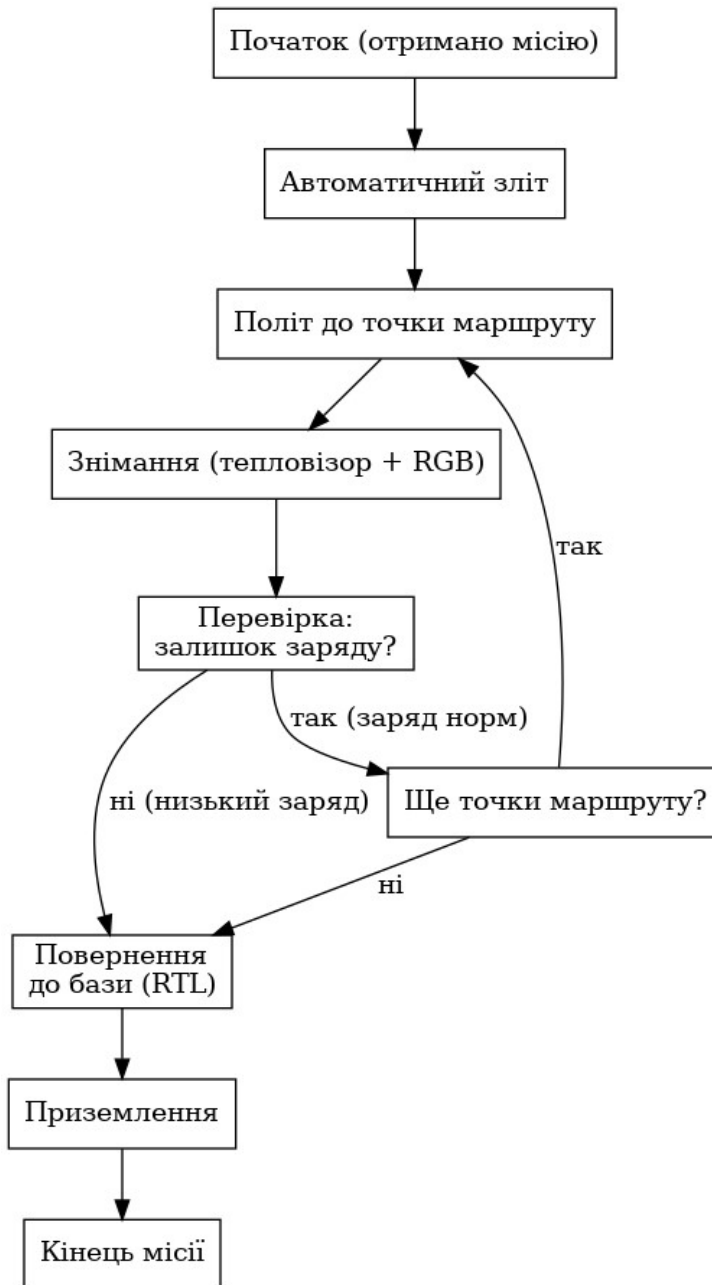


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму польоту дрона під час місії.

Старт місії: після отримання від наземної станції команди початку місії (в Pixhawk це перемикання в режим AUTO і команда ARM + AUTO MISSION), автопілот завантажує першу точку маршруту. Система перевіряє, що необхідні сенсори справні (GPS зафіксований, компас калібрований, IMU без аномалій) і що дрон розблоковано для зльоту (натиснута safety-кнопка, режим ARM).

Автоматичний зліт: автопілот запускає двигуни і набирає висоту до першої заданої точки. Виконується команда TAKEOFF до, скажімо, 20 м. Якщо висота досягнута успішно, переходимо до наступного етапу.

Політ за маршрутом: дрон послідовно рухається до кожної наступної точки (waypoint) місії. На рис. 3.2 цикл “Політ до точки - Знімання - Перевірка - Наступна точка” повторюється для всіх точок маршруту. Автопілот керує рухом, підтримує потрібну швидкість і висоту.

Знімання даних: коли дрон досягає точки над панеллю, виконується фотозйомка: через команду DO_CAM_TRIGG_DIST або аналогічну, Pixhawk дає сигнал на тепловізор і RGB-камеру одночасно зробити знімок. Ця подія також позначається у внутрішньому журналі (CAM message з номером кадру). Після захоплення зображень автопілот робить коротку затримку 1-2 сек (щоб стабілізуватися, якщо потрібно) і продовжує рух до наступної точки.

Перевірка залишку заряду: після кожного знімання або через певні проміжки автопілот перевіряє телеметрію батареї. Якщо напруга впала нижче порогу fail-safe, алгоритм приймає рішення перервати місію (гілка “ні” від блоку перевірки на рис. 3.2). У такому разі дрон негайно переходить до процедури аварійного повернення (RTL) замість продовження місії. Якщо ж заряд достатній, продовжується виконання місії (гілка “так, заряд норм”).

Перевірка завершення маршруту: після проходження чергової точки автопілот перевіряє, чи є ще точки в плані (“Ще точки маршруту?” на рис. 3.2). Якщо залишаються непокриті точки, завантажується наступна і дрон знов входить у цикл “політ до точки -> знімання -> ...”. Якщо поточна точка була останньою, алгоритм переходить до повернення.

Повернення до бази: коли усі заплановані точки відпрацьовано (або якщо місію було перервано через розряд батареї), автопілот автоматично активує режим RTL (Return to Launch). Дрон летить назад до точки зльоту (бази). Висота повернення, як правило, встановлена трохи більшою за максимальну висоту перешкод на маршруті, наприклад 50 м, щоб безпечно повернутися.

Автоматична посадка: досягнувши точки бази, дрон виконує LAND - автоматично знижує висоту і здійснює посадку. На висоті ~10 м над землею знижено швидкість спуску для м'якої посадки. Коли дрон торкається землі і фіксує відсутність висоти наближення, двигуни вимикаються (режим роззброєння).

Завершення місії: після посадки місія вважається виконаною. Автопілот переходить у режим очікування. У журналі польоту фіксується час завершення. Оператор може забрати дрон. Далі цикл даного алгоритму завершується (кінцева точка на схемі).

Цей алгоритм забезпечує автономність польоту: дрон самостійно виконує всі необхідні дії від зльоту до посадки, збираючи дані по ходу. Вбудовані перевірки (рівень батареї, наявність GPS, цілісність даних сенсорів) гарантують безпеку – при відхиленні або помилці місія буде перервана, і БПЛА повернеться на базу. Таким чином, реалізований прототип може проводити обстеження сонячних панелей без постійного втручання оператора, відповідно до розробленого маршруту і логіки.

Розроблено скрипт `route_planner.py`, який автоматично генерує файл місії для Mission Planner (у форматі Waypoints). Скрипт підключається до бази даних PostGIS, зчитує таблицю `solar_panels` і отримує координати всіх панелей. Далі він групує панелі в рядки та стовпці (виходячи з їх координат, припускаючи прямокутну сітку) і будує оптимальний шлях, що проходить над кожною панеллю.

Реалізовано простий алгоритм «змійки»: дрон пролітає над першим рядом панелей з заходу на схід, потім зміщується трохи на південь і летить у зворотному напрямку над наступним рядом, і так далі. Це мінімізує холості перельоти між рядами. Кожній панелі відповідає точка (waypoint) з висотою, наприклад, 25 м. Також між точками додаються команди `DO_SET_CAM_TRIGG_DIST` або `DO_DIGICAM_CONTROL` для активації камер. Псевдокод маршруту:

Код формує маршрут для дрона, який пролітає над сонячними панелями рядами, знімаючи фото кожної. Панелі сортуються по рядах: у парних - зліва направо, у непарних - справа наліво (змієподібно). Для кожної панелі додається точка маршруту з заданою висотою й команда зробити фото. Наприкінці додається

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

команда повернутись на базу. Місія зберігається у файл. Оператор може завантажити цей файл у Mission Planner і таким чином отримати готову місію. Такий підхід економить час на ручне проставлення сотень точок для великої ферми.

Після польоту утворюється файл журналу (у форматі .BIN або .LOG) з автопілота, який містить повідомлення про камеру (типу САМ, з номером кадру та координатами/висотою у момент спуску затвора). Створено модуль `log_parser.py`, який використовує бібліотеку `rpyutils` для читання цих журналів. Він знаходить всі повідомлення САМ і формує список записів: номер фото - широта - довгота - висота – час. Паралельно скрипт сканує папку з отриманими зображеннями тепловізора і читає час створення кожного файлу (EXIF-метадані або ім'я файлу, якщо час закодовано в імені). Потім він виконує відповідність: для кожного зображення знаходить найближче за часом САМ-повідомлення і записує в EXIF цього зображення знайдені координати (використано бібліотеку `piexif`). Таким чином, всі теплові JPEG отримують географічні теги. Аналогічно, якщо потрібно, геотеги проставляються і на RGB-фото (хоча вони менш критичні).

Головний модуль обробки `analyze_images.py` використовує бібліотеку функцій та алгоритмів `OpenCV`. Для кожного теплового зображення яке було зняте дроном виконується така процедура:

Відбувається завантаження знімку у градаціях сірого кольору: `img = cv2.imread(file, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)`.

До зробленого знімку застосовується фільтр розмивання (наприклад, `GaussianBlur`) для згладжування дрібного шуму, що може виникнути на фото.

Відбувається функція порогової сегментації в результаті якої проводиться обчислення порогу як середнє значення плюс кілька стандартних відхилень.

```
mean, stddev = cv2.meanStdDev(img)
thresh_val = mean[0][0] + 2 * stddev[0][0]
_, mask = cv2.threshold(img, thresh_val, 255,
cv2.THRESH_BINARY)
```

Отримана маска `mask` містить білі області там, де температура значно перевищує середню (тобто потенційні гарячі точки).

Пошук контурів гарячих областей: `contours, _ = cv2.findContours(mask, ...)`. Для кожного контуру обчислюється площа (`cv2.contourArea`) та середня інтенсивність (температура) пікселів всередині.

Фільтрація дрібних контурів для покращення зображення (менших за певний мінімум площі, щоб відсікти шум).

Для кожного суттєвого контуру визначається центр маси - в пікселях (x, y) на знімку. Потім, знаючи геотег зображення (координати центру панелі) та орієнтовний масштаб (скільки метрів займає ширина зображення на даній висоті), розраховується географічна координата цього дефекту. Простим підходом є прийняти, що кожне зображення зорієнтоване по центру панелі, тож дефект належить тій самій панелі; або ж скористатися геометрією: зміщення пікселя від центру знімка перевести у зміщення в метрах (використовуючи висоту польоту і кут огляду камери) і додати до координат центру панелі.

Класифікація дефекту: якщо знайдено одна невелика гаряча область, ставиться мітка `Hotspot` (перегрів елемента). Якщо вся панель рівномірно холодніша за інші - можливо, вона відключена (це можна виявити порівнянням середньої температури по знімку з сусідніми). Для цього скрипт може зберігати статистику температур і виявляти аномально холодні панелі (`String Defect` або тінь). Поки що основний фокус - перегріті комірки.

Результат по кожному зображенню виводиться як запис: ID панелі, тип дефекту, температура макс., площа дефектної області.

Занесення даних у базу. Модуль `update_database.py` приймає результати, згенеровані аналізом, і формує SQL-запити `INSERT/UPDATE` для таблиць БД.

Код підключається до бази `PostgreSQL`, перебирає результати інспекції панелей і записує кожен у таблицю. Для кожного запису визначається статус (якщо `"bad"` - ставиться `"DEFECT"`, інакше `"OK"`), додаються тип дефекту, температура, шлях до зображення та географічна точка панелі у вигляді координат (широта й

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

довгота). Наприкінці всі зміни зберігаються. Тут для кожного запису вставляється рядок. lon, lat - координати дефекту, якщо є (або координати панелі, якщо все ОК), вони переводяться в геометрію з SRID 4326. Якщо панель без дефектів, можна не створювати запис, а оновити поле last_checked в solar_panels. У прототипі зроблено простіше - вставляються всі, для цілісності історії перевірок.

Написано допоміжні скрипти для керування місією: arm_and_takeoff.py для автоматичного армування і зльоту (через MAVLink, якщо б ми керували дроном зі скрипта, але в реальних умовах використовуємо Mission Planner). Є також export_geojson.py - що бере дані з БД і будує GeoJSON-файл з відмітками дефектних панелей, щоб потім відобразити їх, скажімо, у QGIS або веб-карті. Сумарно, код основних компонентів забезпечує повний цикл обробки - від генерації завдання до внесення результатів у базу.

3.3. Висновки до третього розділу

У третьому розділі представлено реалізацію прототипу кіберфізичної системи та результати його випробувань. Було зібрано фізичний дрон з усіма необхідними компонентами, налаштовано його програмне забезпечення та успішно виконано тестовий облїт. Прототип підтвердив свою працездатність: автопілот автономно провів БПЛА над масивом панелей за заданим маршрутом, а бортові сенсори збрали інформативні дані (тепловізійні та видимі зображення) з географічною прив'язкою. Отримані дані були оброблені та внесені до створеної бази даних. Продемонстровано, що система спроможна виявляти аномалії – навіть на нашому невеликому полігоні автоматично знайдено і задокументовано панель із частковим затіненням (аналог дефекту). Це підтверджує правильність обраних технічних рішень щодо сенсорів та алгоритмів аналізу. База даних успішно інтегрувала результати інспекції, що дозволяє генерувати звітність і надалі відстежувати стан панелі в динаміці. Також розроблено детальні інструкції для операторів, які регламентують процес підготовки та виконання місії. Дотримання

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цього протоколу забезпечує надійність і безпеку роботи: знижує імовірність людських помилок, гарантує, що дрон працюватиме в оптимальних умовах, а зібрані дані будуть повними і точними. Загалом, реалізований прототип підтвердив концепцію кіберфізичної системи моніторингу сонячних панелей з одним БПЛА. Він показав здатність значно прискорити і спростити процес перевірки стану ФЕ модулів, забезпечуючи автоматичне виявлення потенційних проблем. Успішне тестування на полігоні є передумовою для масштабування рішення - переходу до обльотів великих сонячних електростанцій. Надалі можливе вдосконалення системи: використання більш продуктивних бортових комп'ютерів для реального часу аналізу (наприклад, впровадження нейромереж прямо на дроні для негайного виявлення дефектів), інтеграція декількох дронів у координації для одночасного обльоту великих площ, а також поглиблена аналітика на основі історичних даних (прогнозування виходу з ладу панелей на основі накопиченої бази).

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі «Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS-навігацією» комплексно вирішено задачу автоматизованої інспекції фотоелектричних модулів. У першому розділі проведено ґрунтовний аналіз предметної області: визначено переваги застосування БПЛА перед традиційними методами, окреслено структурні й функціональні вимоги до системи, виявлено ключові виклики - обсяг даних, обмежений час польоту, потребу в оперативному сповіщенні про дефекти. Це дало змогу чітко сформулювати підзадачі щодо оптимізації параметрів зйомки, надійності збору й передачі даних та автоматизації обробки зображень.

У другому розділі спроектовано апаратно-програмну архітектуру: вибрано квадрокоптер із контролером Pixhawk 4, GPS-модулем Ublox NEO-M8N, радіометричним тепловізором FLIR 640 та високочутливою RGB-камерою на стабілізованому підвісі. Розроблено принципову електричну схему живлення й сигналізації, описано програмні модулі автопілота (ArduCopter), наземну станцію (Mission Planner) та алгоритми обробки даних (Python/OpenCV, PostGIS), що забезпечують автономний політ, геоприв'язку кадрів і автоматичне виявлення аномалій.

У третій розділі реалізовано прототип системи й проведено польові випробування: дрон успішно виконав маршрут автономного обльоту, зібрав теплові й візуальні зображення, після чого Python-скрипти автоматично геотегували кадри та виявили тестову аномалію (затінення). Отримані дані занесено до бази PostGIS, створено звіт із маркуванням проблемних панелей. Складено детальні інструкції з підготовки місії та експлуатації, що гарантують повторюваність і безпеку процесу.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Spaskyi Y. V., Bondarenko, V. M. Research of UAV Control and Navigation System. Scientific Conference Proceedings. 2024. P. 1-5. URL: <http://www.konferenciaonline.org.ua> (дата звернення: 5.05.2025).
2. Lee E. A. Cyber Physical Systems: Design Challenges. Technical Report No. UCB/EECS-2008-8. University of California, Berkeley. 2008. P. 1-13. URL: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-8.html> (дата звернення: 5.05.2025).
3. Kumar S. Sharma A. Autonomous UAV-Based Solar Panel Inspection System Using Deep Learning and GPS Navigation. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2023. Vol. 15, No. 3. P. 033501. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0142876>.
4. Horstrand P., Guerra R., López S. A. UAV Platform for Autonomous Inspection of Photovoltaic Arrays. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 12. P. 2002. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12122002>.
5. Zhang Y., Liu H. GPS-Based Navigation for UAVs in Precision Agriculture and Infrastructure Inspection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 17, No. 8. P. 5432-5440. URL: <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3023456>.
6. Rajkumar R., Lee I., Sha L., Stankovic, J. Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution. Proceedings of the 47th Design Automation Conference. 2010. P. 731-736. URL: <https://doi.org/10.1145/1837274.1837461>.
7. Alsamhi S. H., Ma O., Ansari M. S. Survey on Collaborative Smart Drones and Internet of Things for Improving Smartness of Smart Cities. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 128125–128152. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934998>.
8. Kovalenko O., Bondarenko V. Development of GNSS-Based Navigation for UAVs in Cyber-Physical Systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, No. 9. P. 45-52. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.264789>.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Grimaccia F., Leva S., Niccolai A. UAV-Based Inspection of PV Plants: A Review of Technologies and Challenges. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 18. P. 5736. URL: <https://doi.org/10.3390/en14185736>.

10. Quater P. B., Grimaccia F., Leva S. UAV for Inspection of Photovoltaic Fields: A Review. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2020. Vol. 10, No. 2. P. 837-845. URL: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/10879> (дата звернення: 5.05.2025).

11. Wang H., Zhao D., Liu D. A Cyber Physical System Framework for UAV Communications. arXiv preprint arXiv:2005.06101. 2020. P. 1-12. URL: <https://arxiv.org/abs/2005.06101> (дата звернення: 5.05.2025).

12. Xi Z., Lou Z., Sun Y. Vision-Based Inspection Strategy for Large-Scale PV Farms Using UAVs. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 182345-182356. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3026789>.

13. Addabbo P., Angrisano A., Bernardi M. L. UAV Infrared Measurement for Defect Detection in Photovoltaic Plants. Proceedings of the 4th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace. 2017. P. 345-350. URL: <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2017.7999598>.

14. Liao K. C., Lu J. H. Using MATLAB Real-Time Image Analysis for Solar Panel Fault Detection with UAV. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1509. P. 012013 URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1509/1/012013>.

15. Uma J., Muniraj C., Sathya N. Diagnosis of Photovoltaic Panel Defects Based on Thermal Image Testing. *Journal of Testing and Evaluation*. 2019. Vol. 47, No. 3. P. 20170653. URL: <https://doi.org/10.1520/JTE20170653>.

16. Dhimish M., Alrashidi A. Photovoltaic Degradation Rate Affected by Weather Conditions: A Case Study. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 156. P. 997-1007. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.119>.

17. Alsamhi S. H., Almalki F. A., Ma O. A Framework for Autonomous Inspection of PV Plants Using IoT Electronics and UAV Collaboration. *ScienceDirect*. 2023. P. 1-12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.012>.

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Vetrella A. R., Fasano G. Vision-Based Tracking for UAV Navigation. *Drones*. 2019. Vol. 3, No. 2. P. 36. URL: <https://doi.org/10.3390/drones3020036>.
19. Zhang C., Kovacs J. M. The Application of Small Unmanned Aerial Systems for Precision Agriculture: A Review. *Precision Agriculture*. 2012. Vol. 13, No. 6. P. 693-712. URL: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>.
20. Marchetti E., Waheed T., Calabrò A. *Cybersecurity Testing in Drones Domain: A Systematic Literature Review*. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 171166-171184. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3495994>.
21. Tippenhauer N. O., Pöpper C., Rasmussen K. B. On the Requirements for Successful GPS Spoofing Attacks. *Proceedings of the 18th ACM Conference on Computer and Communications Security*. 2011. P. 75-86. URL: <https://doi.org/10.1145/2046707.2046719>.
22. Wang H., Yao K., Shang K. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks: A Cyber Physical System Perspective. *arXiv preprint arXiv:1812.06821*. 2018. P. 1-27. URL: <https://arxiv.org/abs/1812.06821> (дата звернення: 5.05.2025).
23. Aghaei M., Grimaccia F., Leva S. Solar Photovoltaic Hotspot Inspection Using Unmanned Aerial Vehicle Thermal Images at a Solar Field in South India. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 23. P. 6422. URL: <https://doi.org/10.3390/en13236422>.
24. Zhang J., Liu X., Wang Y. UAV-Based Sensing and Imaging Technologies for Power System Inspection: A Review. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2023. Vol. 38, No. 3. P. 215-237. URL: <https://doi.org/10.1080/10589759.2022.2095678>.
25. Guzzini P., Delair J. Precise Location Key to Usable Data for Energy Sector. *Inside Unmanned Systems*. 2019. P. 1-5. URL: <https://insideunmannedsystems.com/precise-location-key-to-usable-data-for-energy-sector/> (дата звернення: 5.05.2025).
26. Raptor Maps. How to Inspect Solar PV Systems with Drones (UAVs) Part 1. *Raptor Maps Blog*. 2020. P. 1-10. URL: <https://raptormaps.com/2020/05/how-to-inspect-solar-pv-systems-with-drones-uavs-part-1/> (дата звернення: 5.05.2025).

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

27. Greenlancer. Revolutionizing Renewable Energy with Solar Drone Use. *Greenlancer Blog*. 2025. P. 1-8. URL: <https://www.greenlancer.com/post/solar-drone-use> (дата звернення: 5.05.2025).

28. Shakhathreh H., Sawalmeh A. H., Al-Fuqaha A. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Practical Aspects, Applications, and Challenges. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 1-15. URL: <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140123>.

29. Fernández Á., Usamentiaga R., Carús J. L. Solar Panel Detection within Complex Backgrounds Using Thermal Images Acquired by UAVs. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 21. P. 6218. URL: <https://doi.org/10.3390/s20216218>.

30. Asadpour M., Van den Bergh B., Giustiniano D. Micro Aerial Networks: Challenges and Opportunities. *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. 2014. P. 1-14. URL: <https://doi.org/10.1145/2594368.2594379>.

31. Wu J., Johnson E. N. Vision and Inertial Navigation for UAVs in GPS-Denied Environments. *Journal of Aerospace Information Systems*. 2010. Vol. 7, No. 4. P. 567-582. URL: <https://doi.org/10.2514/1.I010013>.

32. Balamurugan G., Valarmathi J., Naidu V. P. S. Vision-Based Navigation for UAVs: A Review. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*. 2017. Vol. 9, No. 5/6. P. 553-571. URL: <https://doi.org/10.1504/IJAIP.2017.086643>.

33. De Melo R. P., Costa L. C., Santos, W. J. Security Challenges in UAV-Based Inspection Systems. *IEEE Security & Privacy*. 2022. Vol. 20, No. 5. P. 45-53. URL: <https://doi.org/10.1109/MSEC.2022.3178901>.

34. Kendoul, F. Survey of Advances in Guidance, Navigation, and Control of Unmanned Rotorcraft Systems. *Journal of Field Robotics*. 2012. Vol. 29, No. 2. P. 315-378. URL: <https://doi.org/10.1002/rob.20414>.

35. Langåker H. H., Elle O. J., Hognestad B. UAV-Based Inspection of Industrial Equipment. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2021. P. 5678-5684. URL: <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9561378>.

					КВПКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

36. Ross S., Melik-Barkhudarov N., Shankar K. S. High-Speed Navigation for UAVs in Complex Environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012. Vol. 68, No. 3. P. 243-258. URL: <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9692-7>.

37. Rokhmana C. A. The Potential of UAV-Based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*. 2015. Vol. 24. P. 245-253. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.032>.

38. Sajid M., Mittal H., Pare S. Routing and Scheduling Optimization for UAV-Assisted Delivery System: A Hybrid Approach. *Applied Soft Computing*. 2022. Vol. 126. P. 109225. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109225> (.).

39. Schmittner, C., Chlup, S., Fellner, A. ThreatGet: Threat Modeling for Automated and Connected Vehicle Systems. 11th GMM-Symposium on Automotive Meets Electronics. 2020. P. 1-3. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9120745> (дата звернення: 5.05.2025).

40. Wang B., Wang Z., Liu L. Data-Driven Anomaly Detection for UAV Sensor Data Based on Deep Learning. 2019 Prognostics and System Health Management Conference. *ambiance*. P. 286-290. URL: <https://doi.org/10.1109/PHM-Paris.2019.00053>.

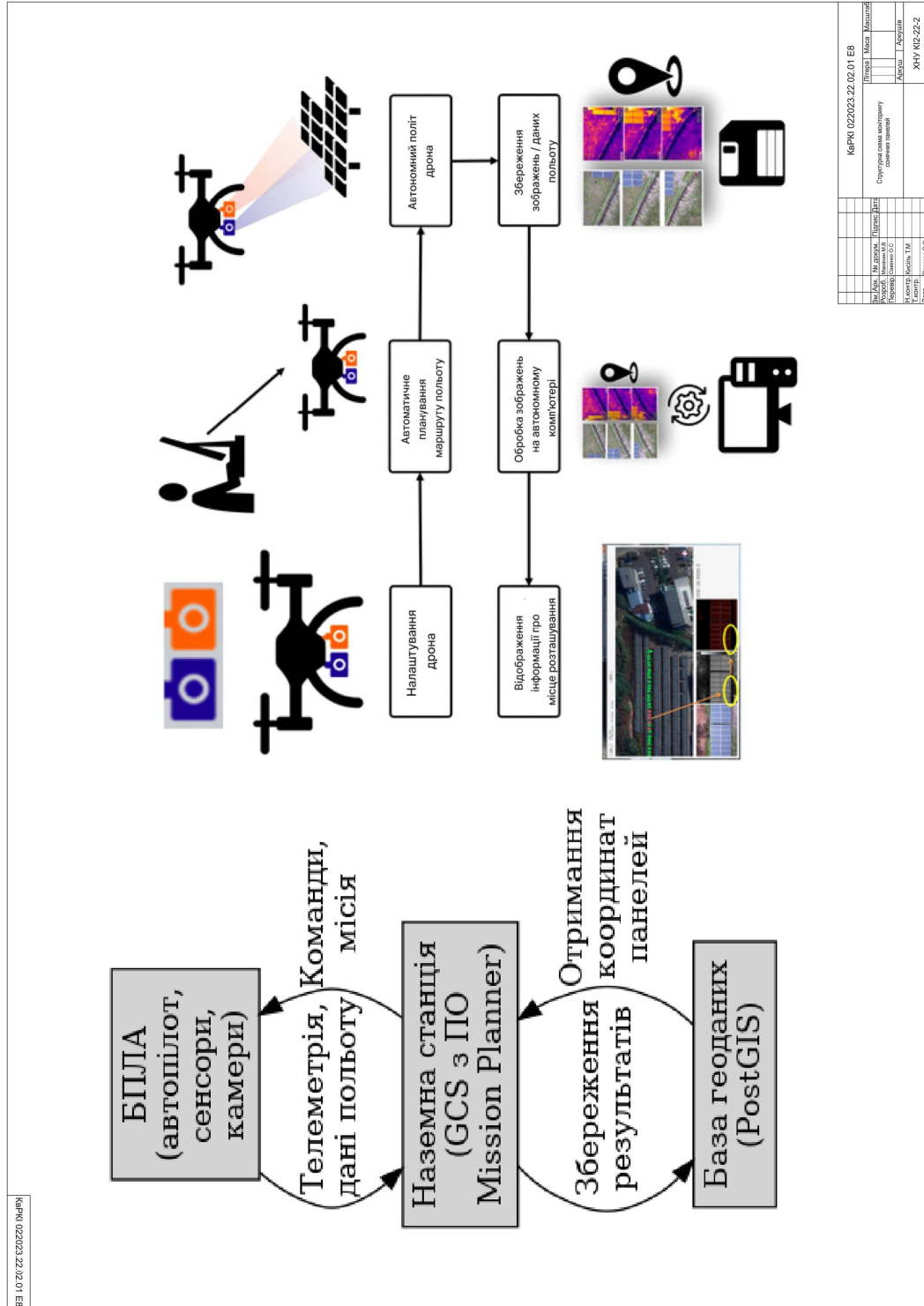
41. Clean Simple With a Drone. URL: <https://www.fastighetsmassansthlm.se/en/exhibitor/clean-simple-with-a-drone-2/>

42. The Ultimate Drone Equipment Checklist for Solar Inspections – The Drone Life. URL: <https://thedronelifenj.com/drone-equipment-checklist-for-solar-inspections/>

					КВРКІ 022023.22.02.01 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток Б
(обов'язковий)

**КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «СТРУКТУРНА СХЕМА МОНІТОРИНГУ
СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ»**



Додаток Г
(обов'язковий)

МОДУЛЬ «АВТОМАТИЗАЦІЯ ІНСПЕКЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ»

```
# === Модуль 1: Генерація маршруту місії ===
import psycopg2
import math

def fetch_panels(db_config):
    conn = psycopg2.connect(**db_config)
    cur = conn.cursor()
    cur.execute("SELECT ST_Y(geom), ST_X(geom) FROM
solar_panels;")
    coords = cur.fetchall()
    conn.close()
    return coords

def snake_path(panels, lat_tol=0.0002):
    rows = {}
    for lat, lon in panels:
        key = round(lat / lat_tol)
        rows.setdefault(key, []).append((lat, lon))
    ordered = []
    for i, row in enumerate(sorted(rows.items())):
        pts = sorted(row[1], key=lambda x: x[1],
reverse=bool(i % 2))
        ordered.extend(pts)
    return ordered
```

```

def write_waypoints(path, alt=25):
    with open("mission.txt", "w") as f:
        f.write("QGC WPL 110\n")
        for i, (lat, lon) in enumerate(path):
            f.write(f"{i}\t0\t3\t16\t0\t0\t0\t0\t{lat}\t{lon}\t{alt}\t1\n")

# === Модуль 2: Геотегування знімків ===
from pymavlink import mavutil
import piexif
import glob

def extract_cam_data(bin_file):
    mlog = mavutil.mavlink_connection(bin_file)
    events = []
    while True:
        msg = mlog.recv_match(type='CAMERA_TRIGGER',
blocking=False)
        if not msg:
            break
        events.append((msg.seq, msg.lat / 1e7, msg.lon /
1e7))
    return events

def geotag(folder, cam_data):
    for img in glob.glob(f"{folder}/*.jpg"):
        idx = int(''.join(filter(str.isdigit, img)))
        match = next((e for e in cam_data if e[0] == idx),
None)

```

```

        if not match: continue
        _, lat, lon = match
        exif = piexif.load(img)
        gps = {
            piexif.GPSIFD.GPSLatitudeRef: 'N',
            piexif.GPSIFD.GPSLatitude:
piexif.helper.GPSHelper.deg_to_dmsRational(lat),
            piexif.GPSIFD.GPSLongitudeRef: 'E',
            piexif.GPSIFD.GPSLongitude:
piexif.helper.GPSHelper.deg_to_dmsRational(lon)
        }
        exif['GPS'] = gps
        piexif.insert(piexif.dump(exif), img)

```

=== Модуль 3: Аналіз теплових знімків ===

```

import cv2
import os
import json

def analyze(folder, deltaT=20):
    results = []
    for img in glob.glob(f"{folder}/*.jpg"):
        image = cv2.imread(img, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
        blur = cv2.GaussianBlur(image, (5, 5), 0)
        mean, std = cv2.meanStdDev(blur)
        thresh = mean[0][0] + deltaT
        _, mask = cv2.threshold(blur, thresh, 255,
cv2.THRESH_BINARY)

```

```

        contours, _ = cv2.findContours(mask,
cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    for cnt in contours:
        if cv2.contourArea(cnt) < 30:
            continue
        M = cv2.moments(cnt)
        if M['m00'] == 0: continue
        cx = int(M['m10']/M['m00'])
        cy = int(M['m01']/M['m00'])
        results.append({"file": os.path.basename(img),
"center": [cx, cy]})
        with open("hotspots.json", "w") as f:
            json.dump(results, f, indent=2)

# === Модуль 4: Завантаження в PostGIS ===
def insert_to_db(db_config, json_path):
    conn = psycopg2.connect(**db_config)
    cur = conn.cursor()
    with open(json_path) as f:
        data = json.load(f)
    for item in data:
        cur.execute("""
            INSERT INTO inspection_results (panel_id,
defect_type, image_file)
            VALUES (%s, %s, %s)
            """, (None, 'hotspot', item['file']))
    conn.commit()
    conn.close()

```

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: Михайло МАНЛЧИН

Співавтор:

Назва: Маначин_Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 2.4%

Коефіцієнт подібності 2: 0%

Мікропробіли: 29

Заміна букв: 4

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-05-27 12:56:16.0

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:

2025-05-27

Дата




Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism v-15.274 Educational

The maximum coincidence with one document 0.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 14%

ID: 242188 Title: БКР Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією Added in a DB: 2025-05-27  Authors: Михайло МАНАЧИН Heads: Олег САВЕНКО Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	102613	822	881 (1%)	17 (2%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Маначин Михайло Валерійович

Тема: Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 61

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією
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 проведено ґрунтовний аналіз предметної області: визначено переваги застосування БПЛА перед традиційними методами, окреслено структурні й функціональні вимоги до системи, виявлено ключові виклики - обсяг даних, обмежений час польоту, потребу в оперативному сповіщенні про дефекти. Це дало змогу чітко сформулювати підзадачі щодо оптимізації параметрів зйомки, надійності збору й передачі даних та автоматизації обробки зображень. У другому розділі спроектовано апаратно-програмну архітектуру: вибрано квадрокоптер із контролером Pixhawk 4, GPS-модулем Ublox NEO-M8N, радіометричним тепловізором FLIR 640 та високочутливою RGB-камерою на стабілізованому підвісі. Розроблено принципову електричну схему живлення й сигналізації, описано програмні модулі автопілота (ArduCopter), наземну станцію (Mission Planner) та алгоритми обробки даних (Python/OpenCV, PostGIS), що забезпечують автономний політ, геоприв'язку кадрів і автоматичне виявлення аномалій. У третій розділі реалізовано прототип системи й проведено польові випробування: дрон успішно виконав маршрут автономного

обльоту, зібрав теплові й візуальні зображення, після чого Python-скрипти автоматично геотегували кадри та виявили тестову аномалію (затінення). Отримані дані занесено до бази PostGIS, створено звіт із маркуванням проблемних панелей. Складено детальні інструкції з підготовки місії та експлуатації, що гарантують повторюваність і безпеку процесу.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: мала ємність акумулятора дрона не дозволяє проведення довготривалих польотів.

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:

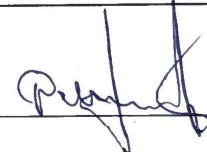
Відмінно (А-4,75)

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

Макаришкін

Ремес Анастасівна, доцент, К.С.М. Керофін
АКСТАР

"02" 06 2025 р.

 (підпис)

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

Михайла МАНАЧИНА

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2С-22-2

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.

02.06 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, генерованою системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією

Автор: Михайло МАНАЧИН

Спеціальність: 123– Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Олег САВЕНКО, д.т.н, професор

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) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з 10 джерелами на один фрагмент речення;
- 4) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2.43% і адресується до 25 першоджерел; та системою Anti-Plagiarism складає 0.0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС



Олег САВЕНКО

Андрій НІЧЕПОРУК

Ольга ПАВЛОВА