

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

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

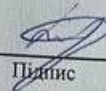
КвРКІ 022004.22.02.03 ПЗ
Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

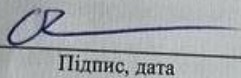
Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

Виконав: студент III курсу, група КІ2с-22-1


Підпис

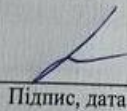
Ігор ВИСОЦЬКИЙ
Ініціали, прізвище

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

«16» 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**

Висоцький Ігор Павлович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією

Керівник проекту (роботи) Савенко Олег Станіславовч, д.т.н., проф.

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 декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS-навігацією

Проектування кіберфізичної системи з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей з

GPS навігацією

Апаратно-програмна реалізація кіберфізичної системи з декількома БПЛА для обльоту

сонячних

панелей

з

GPS

навігацією

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

Структурна схема БПЛА

Алгоритм роботи кіберфізичної системи

Принципова схема польотного контролера ARM2.8

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 – Кіберфізична система з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – проектування кіберфізичної системи з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією	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

Ігор ВИСОЦЬКИЙ
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Олег САВЕНКО
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

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

Автор роботи: Ігор ВИСОЦЬКИЙ.

Керівник роботи: Савенко Олег Станіславович.

Пояснювальна записка: 63 с., 32 рис., 3 дод., 47 джерел.

Графічна частина: 3 креслення

Метою дипломної роботи є створення прототипу кіберфізичної системи, здатної забезпечувати автономний моніторинг сонячних панелей із використанням декількома БПЛА та GPS-технологій.

Об'єктом дослідження є функціонування системи з декількома БПЛА для обльоту сонячних станцій.

Предметом дослідження є оцінка режимів використання БПЛА для моніторингу сонячних панелей.

Під час проведення даного дослідження був використаний метод систематичного огляду літератури для вивчення і аналізу предметної області даного дослідження з джерел інформації..



Підпис студента

30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА З ДЕКІЛЬКОМА БПЛА ДЛЯ ОБЛЬОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З GPS НАВІГАЦІЄЮ	4
1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей кіберфізичної системи з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей	4
1.2 Аналіз програмно-апаратного забезпечення обробки інформації в кіберфізичній системі з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей	11
1.3 Висновки	18
2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ З ДЕКІЛЬКОМА БПЛА ДЛЯ ОБЛЬОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З GPS НАВІГАЦІЄЮ	20
2.1 Визначення апаратних підсистем програмно-технічного засобу	20
2.2 Визначення програмних підсистем програмно-технічного засобу	32
2.4 Висновки	39
3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ З ДЕКІЛЬКОМА БПЛА ДЛЯ ОБЛЬОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З GPS НАВІГАЦІЄЮ	41
3.1 Апаратна реалізація кіберфізичної системи	41
3.2 Програмна реалізація кіберфізичної системи	50
3.3 Висновки	61
ВИСНОВКИ	63

КвРКІ 022004.22.02.03 ПЗ

Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата	Літера	Арк.ш.	Арк.шіт.
Виконав		Ігор ВИСОЦЬКИЙ			у	2	63
Перевір.		Олег САВЕНКО					
Н.контр.		Тетяна КИСЛЬ		16.08.25			
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		16.08.25			

Кіберфізична система з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією

ХНУ КІ2с-22-1

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	64
ДОДАТОК А	68
ДОДАТОК Б	69
ДОДАТОК В	70

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

ВСТУП

У сучасному світі розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, вимагає впровадження новітніх технологій для ефективного контролю, обслуговування та моніторингу інфраструктури. Сонячні електростанції здебільшого займають велику площу, що робить складним ручний нагляд за станом фотомодулів і виникає потреба в автоматизації їх перевірки.

Одним із перспективних підходів до вирішення цієї проблеми є застосування кіберфізичних систем, що інтегрують фізичні об'єкти з цифровими алгоритмами керування через мережу. Прикладом таких систем є безпілотні літальні апарати (БПЛА), які можуть автономно здійснювати обліт території, здійснювати візуальний чи тепловізійний моніторинг, а також передавати зібрані дані в режимі реального часу.

Тому є необхідною розробка та дослідження кіберфізичної системи з декількома БПЛА, орієнтованої на обліт сонячних панелей із використанням GPS-навігації. Система повинна забезпечувати координацію дій кількох безпілотників, планування маршрутів, синхронізацію польотів та аналіз отриманої інформації, що дозволяє підвищити ефективність технічного обслуговування сонячних електростанцій, зменшити час перевірок і знизити людський фактор.

Отже, метою дипломної роботи є створення прототипу кіберфізичної системи, здатної забезпечувати автономний моніторинг сонячних панелей із використанням декількох БПЛА та GPS-технологій.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА З ДЕКІЛЬКОМА БПЛА ДЛЯ ОБ'ЄКТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З GPS НАВІГАЦІЄЮ

1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей кіберфізичної системи з декількома БПЛА для об'єкту сонячних панелей

У нинішній етап розвитку відновлюваної енергетики особливу роль відіграють сонячні електростанції (СЕС), які займають важливе місце як на промисловому, так і на побутовому рівнях. З ростом їх популярності та поширенням застосування виникає необхідність в постійному контролі та підтримці їх ефективності. Оскільки продуктивність сонячних панелей безпосередньо залежить від їхнього технічного стану, своєчасне виявлення дефектів, пошкоджень або забруднень є необхідною умовою для забезпечення стабільної роботи енергетичних установок. Традиційні методи інспекції[4], які часто включають ручну перевірку та фізичне обслуговування, є досить трудомісткими, дорогими та небезпечними для персоналу, особливо коли йдеться про великі промислові об'єкти або важкодоступні території.

Останнім часом завдяки розвитку безпілотних літальних апаратів, процес інспекції сонячних електростанцій зазнав значних змін. БПЛА, оснащені спеціальними камерами та сенсорами[1], зокрема радіометричними тепловізійними камерами [2], тепер стали основним інструментом для виконання аеротермографічних обстежень сонячних фотоелектричних систем. Цей метод дозволяє швидко та безпечно виявляти дефекти і аномалії на панелях, при цьому забезпечуючи високу точність діагностики на рівні 95-99%. Аеротермографія, в свою чергу, виявилась універсальним і ефективним методом інспекції, який використовують не тільки під час запуску нових фотоелектричних установок, але й під час щорічного технічного обслуговування, а також для виявлення причин зниження продуктивності або підтвердження гарантійних претензій, пов'язаних з деградацією модулів.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Одним з основних елементів успішної інспекції сонячних панелей є спеціалізоване обладнання, яке використовують БПЛА. Найважливіше – це система візуалізації корисного навантаження дрону, яка має здатність здійснювати точні вимірювання температури панелей і визначати їхній стан. Важливим аспектом є використання радіометричних тепловізійних камер, які здатні захоплювати не тільки теплові, а й візуальні зображення. Сучасні рішення включають використання подвійних камер з інфрачервоними (ІЧ) та RGB-лінзами в одному корпусі [3], що дозволяє одночасно отримувати як теплові, так і кольорові зображення, що покращує точність діагностики.

Одним з популярних варіантів тепловізійних об'єктивів є 13-міліметровий об'єктив, хоча для різних типів інспекції застосовують і інші варіанти з об'єктивами 9 мм або 19 мм. Для виконання інспекцій сонячних панелей БПЛА повинні відповідати вимогам промислового класу. Наприклад, БПЛА серії Matrice 200 [46] (див. рис 2.1), що має кілька роторів, або дрон з фіксованими крилами, наприклад, senseFly eBee X [47] (див. рис 2.2), здатні забезпечити високу стабільність і точність під час польотів та зйомки.



Рисунок 2.1 – БПЛА Matrice 200 з тепловізійною камерою [46]

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.2 – БПЛА senseFly eBee X [47]

З огляду на глобальні виклики, пов'язані зі зниженням викидів CO₂ і досягненням кліматичної нейтральності, підвищення ефективності сонячних електростанцій стає критично важливим завданням. Автоматизовані системи моніторингу, які базуються на БПЛА з GPS-навігацією, сприяють значній цифровій трансформації енергетичного сектору. Вони дозволяють не тільки знижувати витрати на обслуговування, а й підвищувати рівень безпеки, забезпечуючи високу точність діагностики дефектів і поломок на сонячних панелях.

Використання БПЛА в складі кіберфізичних систем (КФС) [5] для інспекції сонячних панелей дозволяє створювати інтегровані автоматизовані мережі, що працюють в умовах відновлюваної енергетики. Інтеграція таких технологій, як ІoT (Інтернет речей), штучний інтелект (ШІ) та передові навігаційні системи, зокрема GPS, RTK та SLAM, дає можливість підвищити ефективність моніторингу та інспекції сонячних електростанцій. Системи в реальному часі дозволяють автоматично аналізувати зібрані дані, визначати аномалії та робити прогнози щодо технічного стану установки. Це відкриває нові горизонти для розвитку розумних енергетичних мереж (Smart Grid), створюючи умови для забезпечення енергетичної стабільності та економічної ефективності в майбутньому.

Інтеграція кіберфізичних систем у сферу відновлюваної енергетики [12] є стратегічним кроком для досягнення сталого розвитку та забезпечення безперервної та економічної експлуатації сонячних панелей, що в кінцевому

					КвРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результаті сприяє досягненню глобальних цілей з охорони довкілля та скорочення викидів парникових газів.

Інтеграція декількох безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в процес інспекції сонячних станцій дозволяє суттєво змінити підхід до моніторингу і обслуговування великих інфраструктур. Висока ефективність використання флоту БПЛА [13] в порівнянні з одиничними пристроями стає очевидною при розгляді кількох ключових аспектів, таких як покриття великої території, точність збору даних, а також безпека та масштабованість таких систем.

Одним з основних викликів при обслуговуванні великих сонячних станцій є потреба в швидкому та ефективному покритті всіх панелей для перевірки їх стану. При використанні одного БПЛА [9], завдання обльоту може затягуватися на кілька годин або більше, залежно від розміру станції. Однак використання флоту безпілотників дозволяє здійснювати паралельний обліт різних частин об'єкта, що значно скорочує час виконання інспекції. Такий підхід не лише прискорює процес, а й дозволяє одночасно виконувати детальніші перевірки з різних ракурсів, забезпечуючи кращу точність збору даних.

Група БПЛА дозволяє швидше облітати територію, що також дає можливість значно збільшити точність збору даних[6]. Багато БПЛА, які одночасно працюють в різних точках зору, можуть забезпечити більш детальні зображення і дані, що значно підвищує ефективність виявлення проблем на панелях, таких як тріщини, пошкодження або перегрів. Це важливо, оскільки навіть незначні дефекти можуть вплинути на ефективність роботи сонячних панелей, тому їх виявлення на ранніх етапах дозволяє значно знизити ризик серйозних збоїв в роботі станції.

Застосування технологій, таких як обробка зображень за допомогою штучного інтелекту (ШІ) або машинне навчання, може автоматизувати процес аналізу даних, дозволяючи дронам не лише зібрати інформацію, а й здійснювати її попередній аналіз. Це дає змогу швидше реагувати на виявлені проблеми та робити автоматичні коригування в плануванні завдань для інших дронів.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З технічними збоями або відмовами обладнання можуть виникнути серйозні проблеми, якщо у роботі бере участь лише один дрон. Втрата сигналу або несправність одиничного БПЛА може призвести до припинення інспекції, що ускладнить виконання завдання та значно збільшить час на його виконання. У разі використання кількох дронів, навіть якщо один з них виходить з ладу, інші продовжують виконувати свою роботу, зберігаючи безперервність процесу інспекції. Це дозволяє значно знизити ризики, пов'язані з відмовами техніки.

Безпека також досягається завдяки можливості автоматичної корекції маршрутів у разі непередбачених змін в умовах навколишнього середовища. Наприклад, зміна погодних умов або появи нових перешкод на маршруті може бути миттєво виявлена, і система автоматично скоригує маршрут для уникнення небезпек.

Енерговитрати є однією з головних обмежень для тривалих місій БПЛА, особливо в умовах, коли необхідно покрити великі території. Однак, використання флоту дронів [7] дозволяє оптимізувати енергоспоживання, оскільки кожен дрон може виконувати свою частину завдання та передавати її іншому дрону для продовження роботи після розряду батареї. Завдяки такій схемі можна значно збільшити тривалість місії, забезпечуючи безперервний процес інспекції без ризику вичерпання енергії у всіх дронів одночасно.

До того ж, системи планування польотів можуть враховувати рівень заряду батарей кожного дрону та оптимізувати маршрути для мінімізації енергетичних витрат, вибираючи найефективніші шляхи між точками інспекції.

Система з декількома БПЛА [10] відрізняється високою масштабованістю та адаптивністю. Коли розмір сонячної станції збільшується, або з'являються нові модулі, кількість дронів можна просто збільшити, щоб покрити більшу територію за той самий час. Також за допомогою динамічного планування завдань БПЛА можуть швидко адаптуватися до змін в умовах роботи, таких як зміни погоди, пошкодження панелей або збої у роботі одного з дронів.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це дозволяє гнучко налаштовувати систему під потреби інспекції і забезпечувати високий рівень ефективності навіть у разі змін на місці.

Координація роботи декількох БПЛА [11] дозволяє ефективно розподіляти навантаження серед дронів, запобігаючи перевантаженню одного конкретного апарату. Завдяки алгоритмам розподілу завдань, зокрема заснованим на Вороному діаграмі або методах планування на основі пріоритетів, можна автоматично визначати оптимальні зони покриття для кожного дрону, що допомагає забезпечити рівномірний розподіл ресурсів і зменшити час на інспекцію кожної конкретної ділянки.

Такі алгоритми дозволяють адаптувати роботу флоту до реальних умов на місці, зменшуючи затримки та оптимізуючи процеси, що в кінцевому підсумку збільшує продуктивність і зменшує витрати часу та ресурсів.

Таким чином, використання декількох безпілотних літальних апаратів [14] для інспекції та ремонту сонячних станцій має значні переваги перед традиційними методами. Це дозволяє забезпечити швидкість, точність, безпеку, енергетичну ефективність та масштабованість, що є важливими факторами для успішного обслуговування великих енергетичних об'єктів.

1.2 Аналіз програмно-апаратного забезпечення обробки інформації в кіберфізичній системі з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей

Застосування кіберфізичних систем (КФС) у сфері відновлюваної енергетики, зокрема для моніторингу стану сонячних панелей, є важливою складовою процесу цифрової трансформації енергетичних систем. У цьому контексті безпілотні літальні апарати (БПЛА) стають потужним інструментом для інспекції фотоелектричних установок завдяки своїй мобільності, високій точності та здатності до автономного функціонування в складі комплексних КФС.

Головною навігаційною технологією для таких систем є глобальна система позиціонування (GPS) [8], яка забезпечує необхідну точність координування руху

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кількох БПЛА в межах заданих маршрутів. Схема роботи системи зображена на рисунку 2.3. GPS-навігація дозволяє підтримувати стабільні траєкторії польотів, проводити повторні обльоти в ідентичних координатах та гарантовано здійснювати моніторинг сонячних панелей з високою роздільною здатністю.

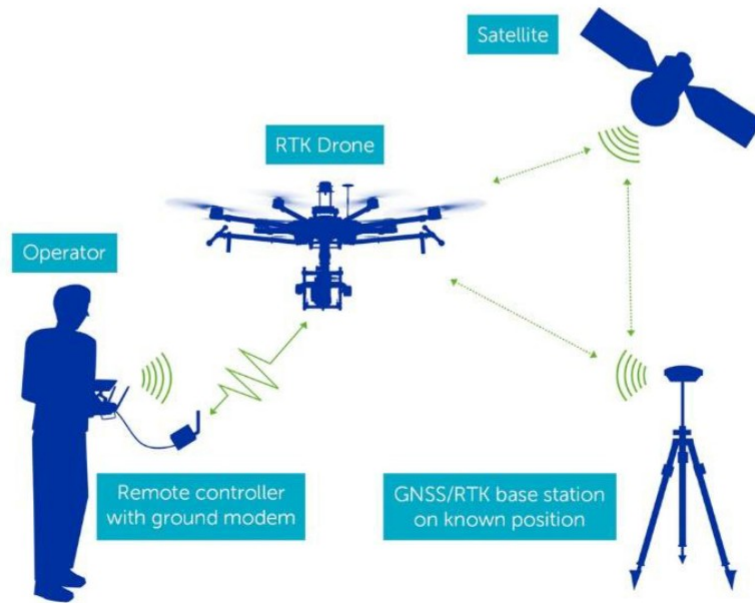


Рисунок 2.3 – Схема системи GPS [8]

Однак традиційні GPS-системи мають певні обмеження, особливо в умовах слабого сигналу або перешкод, таких як густі лісові масиви або великі металеві конструкції, що може призвести до зниження точності.

Для подолання цих обмежень у системах професійного рівня, зокрема в складі кіберфізичних систем з кількома БПЛА, активно використовуються додаткові методи позиціонування. Одним з таких є диференціальний GPS (DGPS), який дозволяє досягти сантиметрової точності завдяки використанню корекційних сигналів з наземних станцій. Інший інноваційний підхід – це RTK (Real-Time Kinematic) [44] навігація, що дозволяє досягти ще більш високої точності позиціонування – до 1–2 см, що є критичним для обльотів сонячних панелей, які часто мають щільне компонування. Схема роботи показана на рисунку 2.4.

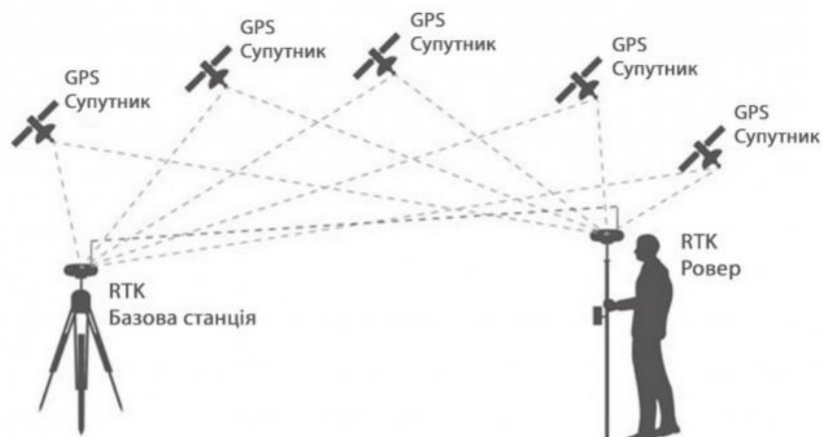


Рисунок 2.4 – Схема навігації RTK [44]

Окрім супутникових методів, в останні роки набувають популярності візуальні системи позиціонування, зокрема SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)[45](див. рис. 2.5).

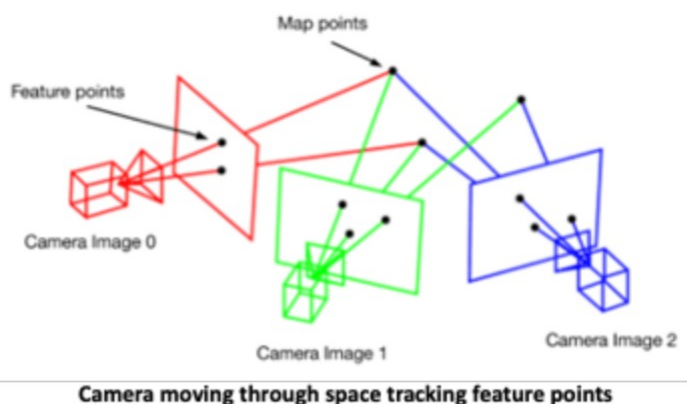


Рисунок 2.5 – Схема системи позиціонування SLAM [45]

Ця технологія використовує камери або LiDAR (Light Detection and Ranging) для створення карти місцевості і одночасного визначення координат БПЛА. В рамках кіберфізичних систем ці методи дозволяють значно підвищити точність позиціонування та знизити залежність від супутникових сигналів, що особливо важливо в складних умовах, таких як затінені зони або урбанізовані території.

Інтеграція таких навігаційних технологій, як GPS, RTK та SLAM, у багатокомпонентну систему навігації дозволяє забезпечити високу надійність роботи цілих роїв дронів, що виконують інспекцію сонячних панелей. Центральний або периферійний обробний модуль, який координує дії БПЛА, здійснює обмін даними з наземними станціями через бездротові протоколи зв'язку, такі як Wi-Fi, 4G/5G або LoRa. Це дає змогу здійснювати точну координацію маршрутів, а також оперативно оновлювати їх залежно від результатів аналізу сенсорних даних або виявлення дефектів фотомодулів.

Такі інноваційні технології впроваджуються на практиці в багатьох країнах, включаючи Європу, США та Китай, де вже спостерігається значне покращення точності діагностики та зниження потреби в людському втручанні. Водночас, завдяки автоматизації процесів, зростає тривалість експлуатації сонячних панелей, що значно знижує витрати на їх обслуговування.

Ключовим моментом є те, що поєднання штучного інтелекту, Інтернету речей (IoT), точного позиціонування та безпілотних технологій становить основну основу для розвитку нової парадигми розумної енергетики. Ці технології дозволяють створювати автономні, ефективні та стійкі системи моніторингу та обслуговування відновлювальних джерел енергії, що суттєво підвищує їх ефективність і надійність у довгостроковій перспективі.

Інспекція сонячних панелей є ключовим елементом ефективного функціонування та довгострокової експлуатації сонячних електростанцій. У зв'язку з постійним зростанням потужностей відновлюваної енергетики та збільшенням площ сонячних електростанцій виникає потреба в більш ефективних, швидких і точних методах контролю за станом фотоелектричних модулів. У цьому контексті особливу актуальність набуває використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які значно розширюють можливості технічного обслуговування й діагностики.

Застосування БПЛА для інспекції сонячних панелей дозволяє істотно зменшити витрати часу, покращити точність перевірок, знизити ймовірність

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

людських помилок та зменшити потребу у фізичній присутності персоналу в небезпечних або важкодоступних місцях. Безпілотники можуть працювати автономно або напівавтономно за заданим маршрутом, що дає змогу виконувати перевірки регулярно, системно та в межах заздалегідь визначених стандартів якості.

БПЛА оснащуються різними типами сенсорів та камер, серед яких особливо важливими є інфрачервоні (термографічні) камери [2], здатні фіксувати температурні аномалії на поверхні панелей. Ці аномалії часто вказують на наявність внутрішніх дефектів, мікротріщин, пошкоджених елементів або забруднень, які ускладнюють роботу панелі та знижують її продуктивність. Таким чином, термографія дає змогу не лише фіксувати наявність проблем, але й прогнозувати їхній розвиток на ранніх стадіях.

Крім термографії, використовуються високочутливі RGB-камери високої роздільної здатності, які забезпечують створення детальних зображень поверхні панелей. Отримані дані можуть бути оброблені за допомогою спеціалізованих алгоритмів комп'ютерного зору та штучного інтелекту, що автоматично ідентифікують дефекти: знебарвлення, тріщини, подряпини, забруднення або механічні пошкодження. Завдяки машинному навчанню системи можуть адаптуватися до нових типів пошкоджень і з часом підвищувати точність розпізнавання.

Ще одним важливим елементом сучасних інспекційних технологій є використання Інтернету речей (IoT). Сучасні сонячні панелі можуть бути обладнані сенсорами, які збирають дані про температуру, струм, напругу, рівень забруднення тощо. БПЛА, здійснюючи обльоти, можуть одночасно отримувати ці дані через бездротові канали зв'язку та передавати їх на сервери або в хмарні сховища для подальшого аналізу. Це дозволяє формувати повну картину стану електростанції в режимі реального часу, автоматизуючи процеси прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтеграція БПЛА, сенсорних мереж, аналітичного програмного забезпечення та систем керування в єдину кіберфізичну систему дозволяє здійснювати моніторинг, аналіз та управління в реальному часі. Такий підхід забезпечує високу оперативність, точність і ефективність у виявленні та усуненні несправностей, дозволяє зменшити простої, мінімізувати втрати електроенергії та знизити експлуатаційні витрати. Кіберфізична система координує роботу всіх елементів як фізичних (БПЛА, сенсори, панелі), так і цифрових (алгоритми, платформи обробки даних) в єдину автоматизовану екосистему.

Завдяки гнучкості та мобільності БПЛА, можливо ефективно проводити інспекції у важкодоступних умовах, наприклад, на дахах будівель, у гористій або пустельній місцевості, де традиційні методи перевірки є надто складними або навіть небезпечними. БПЛА здатні адаптуватися до умов навколишнього середовища, працювати в автоматичному режимі за заданими маршрутами, змінювати маршрут у разі виявлення перешкод, а також повторювати об'їзди для моніторингу змін у часі.

Таким чином, використання БПЛА для інспекції сонячних панелей не лише забезпечує новий рівень точності, ефективності та безпеки технічного обслуговування, а й відкриває перспективи для глибокої інтеграції з штучним інтелектом, IoT, хмарними обчисленнями та автоматизованими системами управління. Це робить такі рішення незамінними в умовах масштабування енергетичних проєктів і переходу до більш «розумної» та стійкої енергетичної інфраструктури.

Кіберфізичні системи (КФС) становлять собою синергічне поєднання фізичних процесів, вбудованих обчислень, інтелектуальних алгоритмів та мережових технологій, що дозволяє забезпечити інтегроване управління, адаптацію та самонавчання в режимі реального часу. Вони функціонують як багаторівневі архітектури, у яких фізичні компоненти – сенсори, виконавчі механізми, обчислювальні модулі, елементи управління та комунікаційні вузли – постійно взаємодіють із цифровими моделями, що формуються на основі зібраних

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

даних. Це дозволяє створювати системи, які не тільки відображають поточний стан об'єкта управління, але й здатні прогнозувати його поведінку та динамічно адаптувати стратегії контролю.

Завдяки стрімкому розвитку Інтернету речей (IoT) та штучного інтелекту (ШІ), функціональні можливості КФС значно розширилися. IoT створює глобальне середовище підключених об'єктів, кожен з яких має здатність до збору, обміну та попередньої обробки інформації. У той час як ШІ забезпечує аналіз великих масивів даних, генерацію рекомендацій та автономне прийняття рішень, базуючись на попередньому досвіді. Комбінація цих двох технологій у рамках КФС дозволяє реалізувати інтелектуальні адаптивні системи, здатні працювати в умовах невизначеності та змін.

У промисловості та енергетиці, зокрема в сфері обслуговування сонячних електростанцій, КФС відіграють ключову роль у впровадженні концепцій "розумної інфраструктури". Наприклад, система, яка використовує безпілотні літальні апарати (БПЛА) у поєднанні з IoT-сенсорами та інтелектуальною аналітикою, дозволяє не лише проводити інспекцію фотоелектричних модулів, але й управляти технічним обслуговуванням у предиктивному режимі. Замість традиційних планових перевірок, КФС дозволяє визначати необхідність втручання на основі аналітики даних, зібраних у реальному часі, що дозволяє уникати простоїв і продовжувати термін служби обладнання.

У таких системах БПЛА виконують функцію мобільних сенсорних платформ. Оснащені високоточними термографічними камерами, візуальними сенсорами, лазерними далекомірами та мультиспектральними камерами, вони здатні збирати величезні обсяги даних, що характеризують технічний стан панелей.

Завдяки IoT-комунікаціям ці дані передаються на обчислювальні платформи, де за участю ШІ здійснюється обробка, класифікація дефектів, виявлення відхилень від нормальних параметрів, аналіз ефективності роботи окремих секцій станції тощо.

Крім збору даних, КФС дозволяють реалізувати зворотний зв'язок, який має вирішальне значення для динамічного управління маршрутом БПЛА. Наприклад, в

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умовах погіршення погодних умов або виявлення нових об'єктів на маршруті обльоту система може миттєво змінити план польоту дрона, забезпечивши його безпечну та ефективну роботу. Таким чином, КФС виступає не просто як інструмент автоматизації, а як гнучка платформа самостійного адаптивного управління.

Точність переміщення БПЛА є критично важливою для візуальної інспекції сонячних панелей. Застосування GPS-навігації, зокрема технології RTK (Real-Time Kinematic), дозволяє досягти сантиметрової точності позиціонування. Це надзвичайно важливо при побудові детальних карт покриття та для забезпечення стабільного й повторюваного обльоту по визначених маршрутах. У складніших умовах (наприклад, при наявності перешкод для сигналу GPS) система може використовувати додаткові технології, такі як SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), візуальна навігація або інерційні навігаційні системи, що додатково підвищує надійність системи.

Важливим фактором успішного функціонування КФС є безпека. Масштабна взаємодія компонентів і обробка чутливої інформації потребують захищених каналів зв'язку, шифрування даних, автентифікації пристроїв та надійних політик доступу. Крім того, ШІ має працювати згідно з етичними принципами, бути пояснюваним і підконтрольним людині, особливо в системах, де йдеться про критичну інфраструктуру.

Загалом, інтеграція БПЛА, IoT, ШІ та навігаційних систем у межах єдиної кіберфізичної платформи для обслуговування сонячних електростанцій забезпечує безпрецедентний рівень автономії, точності та адаптивності. Це не лише дозволяє знижувати витрати та підвищувати ефективність енергетичних об'єктів, а й формує підґрунтя для розвитку більш стійкої та інтелектуально керованої енергетики майбутнього.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Висновки

Проведений аналіз структурних, функціональних та технологічних особливостей кіберфізичної системи з декількома БПЛА, орієнтованої на інспекцію сонячних електростанцій, засвідчує високий рівень ефективності та перспективність такого підходу в умовах цифрової трансформації енергетичної галузі.

Було з'ясовано, що застосування декількох БПЛА з термографічними камерами та засобами візуального моніторингу дозволяє забезпечити значно швидший та точніший обліт великих сонячних масивів. Завдяки паралельній роботі, автоматичному розподілу маршрутів та використанню інтелектуальних алгоритмів обробки зображень, такі системи підвищують продуктивність технічного обслуговування, знижують енерговитрати, мінімізують ризики технічних збоїв та значно поліпшують якість діагностики. Додатковою перевагою є масштабованість та адаптивність – можливість оперативного збільшення кількості дронів або зміни конфігурації системи в залежності від розміру сонячних станцій чи умов експлуатації.

Акцент зроблено на програмно-апаратних засобах, які забезпечують обробку інформації та навігаційну стабільність роботи флоту БПЛА. Застосування сучасних методів позиціонування – GPS, DGPS, RTK та SLAM – дозволяє забезпечити високу точність координування, навіть в умовах складного рельєфу або перешкод. Центральні та периферійні обчислювальні модулі, що координують роботу дронів у реальному часі, ефективно обробляють сенсорні дані, здійснюють маршрутизацію та адаптацію польотів.

Особливу увагу заслуговує використання елементів штучного інтелекту та Інтернету речей (IoT), які не лише автоматизують процеси збору й аналізу інформації, а й дозволяють створити самонавчальні системи, здатні прогнозувати відмови, оптимізувати енергоспоживання та адаптувати поведінку БПЛА до змін у зовнішньому середовищі. Таким чином, кіберфізичні системи з декількома БПЛА

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формують новий підхід до управління енергетичною інфраструктурою, сприяючи сталому розвитку, зниженню викидів парникових газів та підвищенню надійності відновлюваних джерел енергії.

Поєднання апаратного забезпечення дронів, високоточної навігації, розподілених обчислень, інтелектуального аналізу даних та гнучкої архітектури КФС формує технічно й економічно ефективну платформу для моніторингу сонячних електростанцій. Такий підхід не лише відповідає сучасним викликам у сфері енергетики, але й задає вектор подальших інновацій у галузі автоматизованих систем технічного нагляду.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ З ДЕКІЛЬКОМА БПЛА ДЛЯ ОБ'ЇЗУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З GPS НАВІГАЦІЄЮ

2.1 Визначення апаратної системи програмно-технічного засобу

Кіберфізична система (КФС), орієнтована на моніторинг стану сонячних панелей за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), передбачає тісну інтеграцію апаратного та програмного забезпечення. Архітектура такої системи включає декілька ключових підсистем: апаратну підсистему (дрони, сенсори, GPS-модулі, обчислювальні блоки) та програмну підсистему (системне ПЗ для навігації, обробки даних, зв'язку, ШІ-аналітики тощо).

Основними компонентами апаратної частини є безпілотні літальні апарати (БПЛА), які використовуються квадрокоптери середнього класу, мають можливість тривалого автономного польоту (10–15 хв), оснащені стабілізованими камерами та GPS-модулями, GPS-навігація – модулі типу u-blox NEO-6M дозволяють здійснювати точне позиціонування з точністю до 2.5 метрів, високоякісні RGB-камери та інфрачервоні сенсори, які використовуються для виявлення забруднень або пошкоджень на поверхні панелей та комунікаційні модулі, зокрема LoRa, 4G LTE, Wi-Fi, які забезпечують передачу даних між дронами та базовою станцією.

Програмна підсистема включає операційне середовище для дронів (наприклад, ArduPilot або PX4), яке відповідає за польотне управління, навігаційне програмне забезпечення, котре формує маршрути польоту з урахуванням GPS-координат і карти місцевості, програма аналізу зображень, яка використовує алгоритми машинного навчання для виявлення дефектів на панелях, та безпосередньо інтерфейс оператора – це інформаційна панель, яка візуалізує маршрути польоту, стан дронів, виявлені проблеми тощо.

У даному проєкті як базову платформу для реалізації кіберфізичної системи об'їзду сонячних панелей було обрано квадрокоптер типу DJI Flame Wheel F450,

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оснащений контролером польоту APM 2.8. Така конфігурація є оптимальною з точки зору співвідношення вартості, відкритості архітектури, гнучкості налаштувань та можливості інтеграції з різноманітними сенсорними модулями.

Квадрокоптер DJI F450 (див. рис. 2.1) представляє собою платформу типу "Flame Wheel", побудовану на рамі з композитного матеріалу. Його конструкція дозволяє легко адаптувати систему під різні задачі, включаючи інфрачервоне зондування, фото- або відеофіксацію, збір телеметричних даних тощо. Сумісність з контролером польоту APM 2.8 забезпечує можливість програмування автономних маршрутів польоту з GPS-навігацією, стабілізацію дрона у повітрі, виконання польотних місій за заздалегідь визначеним маршрутом.



Рисунок 2.1 – Квадрокоптер DJI F450 [43]

Серед переваг можна відзначити те, що дрон дозволяє підключати додаткові сенсори (в тому числі камери, тепловізори, ультразвукові сенсори, модулі Wi-Fi чи LoRa) без суттєвих апаратних змін. Це особливо важливо в умовах побудови адаптивної кіберфізичної системи. Також контролер APM 2.8 працює на основі прошивки ArduPilot. Це дозволяє створювати польотні місії, які виконуються автономно, з урахуванням GPS-координат об'єктів інтересу (наприклад, рядів сонячних панелей). Основною перевагою є низька вартість та ремонтпридатність. Завдяки відкритості апаратної архітектури, дрон легко ремонтується, а

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

комплектуючі можна швидко замінити. Також це дозволяє знизити вартість реалізації проєкту порівняно з комерційними платформами, такими як DJI Mavic або Phantom.

Попри низку переваг, слід враховувати недоліки і певні обмеження системи, такі як час польоту, який обмежений ємністю акумулятора, що унеможливорює довготривалі місії без підзарядки або використання змінних батарей; відсутність систем уникнення перешкод у базовій конфігурації потребує ретельного планування маршруту та маневрів; високі вимоги до калібрування і ручного налаштування контролера польоту, що підвищує складність для недосвідчених операторів .

Основне призначення дрона в рамках запропонованої кіберфізичної системи – здійснення регулярного обльоту сонячних панелей з метою виявлення дефектів, гарячих точок, механічних пошкоджень або забруднень поверхні модулів. Для цього дрон оснащується камерою (звичайною або тепловізійною), GPS-модулем для точного позиціонування та телеметричним модулем для передачі даних у режимі реального часу.

Квадрокоптер виконує польотну місію відповідно до завантаженого маршруту, з фіксацією ключових координат. Дані з камери автоматично передаються в базу для подальшої обробки, що дозволяє скоротити час на діагностику та технічне обслуговування СЕС. У разі виявлення аномалії система може сигналізувати оператору або автоматично позначати координати для подальшого візуального огляду.

Одним із ключових компонентів мультикоптера є електродвигуни, які забезпечують створення підйомної сили, маневрування та стабілізацію польоту. У межах проєктування кіберфізичної системи з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS-навігацією було обрано безколекторні електродвигуни DJI 2212, які є надійним і поширеним рішенням у багатьох мультикоптерних платформах, зокрема DJI F450.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модель DJI 2212 належить до класу безколекторних двигунів типу outrunner. Цей тип двигунів має ротор, який обертається навколо статора, що дозволяє досягти високого крутного моменту при відносно невеликих обертах. Це, у свою чергу, позитивно впливає на енергоефективність системи та забезпечує стабільну тягу для польоту БПЛА.

Електродвигуни DJI 2212 (див. рис. 2.2) добре сумісні з пропелерами розміром 8×4.5", 9×4.7", 10×4.5". Для досягнення оптимального співвідношення між споживанням енергії та підйомною силою в даній системі використовується комбінація двигуна DJI 2212 із трибанковим акумулятором Li-Po (3S, 11,1 В) та пропелерами 10×4.5 дюймів. Така конфігурація дозволяє забезпечити тягу на рівні до 900 г з одного двигуна, що є достатнім для стабільного польоту платформи класу F450 з урахуванням додаткового корисного навантаження.



Рисунок 2.2 – Електродвигун DJI 2212 [42]

Однак слід також враховувати деякі обмеження. Зокрема, тягові характеристики DJI 2212 не дозволяють використовувати їх у важких вантажних дронах або в системах, що потребують високої швидкості та вертикального прискорення. Крім того, на ринку представлені більш енергоефективні аналоги, проте вони мають вищу вартість і складніші умови інтеграції.

Для коректного функціонування двигунів до системи включаються електронні регулятори швидкості (ESC) на 30 А, які підтримують необхідний струм і мають відповідну частоту оновлення сигналу. Рекомендується використання ESC

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з прошивками SimonK або BLHeli, які забезпечують швидке реагування та точне керування двигунами, що є критично важливим у випадку автономного або напіваавтономного управління дроном.

Модуль Sony IMX219 [24] (див. рис. 2.3) є CMOS-камерою з роздільною здатністю 3280×2464 пікселів, широко застосовуваною в платах типу Raspberry Pi Camera v2. Камера має низьке енергоспоживання, малу вагу та високу якість зображення, що робить її придатною для використання на легких квадрокоптерах типу DJI F450.

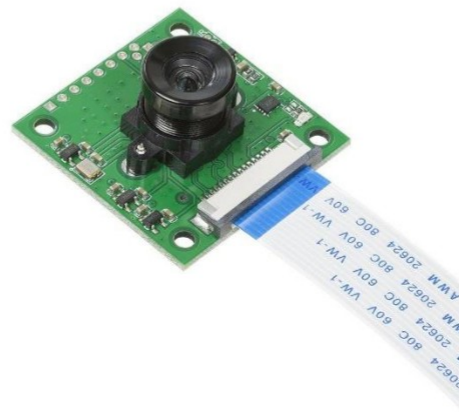


Рисунок 2.3 – Модуль камери Sony IMX219 [24]

Серед основних характеристик варто виділити роздільну здатність 8 мегапікселів, що дає змогу отримувати зображення хорошої якості, також підтримка відеозапису до 1080p 30fps, сумісність з модулем NVIDIA Jetson Nano або Raspberry Pi

Основним перевагами є висока деталізація, яка дозволяє проводити візуальний огляд на наявність фізичних ушкоджень, тріщин, бруду або тіней на панелях, мала вага та розміри, що знижує загальне навантаження на дрон, низька вартість, що дозволяє створювати масштабовані рішення для обльоту великих площ СЕС .

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак основним недоліком цього рішення є неможливість виявлення температурних дефектів, що потребує використання тепловізійного модуля [31] у доповнення до візуальної камери.

В нашому проєкті використано тепловізійну камеру FLIR Lepton, яка зображена на рисунку 2.4. Цей тепловізійний модуль призначений для виявлення теплових аномалій [27] – так званих гарячих точок – які можуть свідчити про часткову деградацію сонячного елемента, погане з'єднання або інші дефекти.

Завдяки своїм мініатюрним розмірам, він може бути інтегрований у бортову систему БПЛА без значного впливу на вагу.



Рисунок 2.4 – Тепловізійна камера FLIR Lepton 3.1R [31]

Перевагами такої камери є виявлення невидимих дефектів, які не фіксуються візуальними камерами, швидкий обліт великих площ, оскільки виявлення дефектів не потребує наближення до кожної панелі а також можливість автоматичної обробки даних за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору.

З недоліків – мала роздільна здатність, що ускладнює виявлення дрібних дефектів без подальшої обробки, вища вартість порівняно з візуальними модулями, необхідність калібрування перед застосуванням у польових умовах.

Залежно від цілей місії, камера [25] може встановлюватися одна або в парі (візуальна та інфрачервона). У такій конфігурації можливе захоплення одночасно

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

двох типів даних – візуальних і теплових, що значно підвищує точність діагностики стану СЕС.

Для ефективного виконання польотних місій з обльоту сонячних електростанцій в автономному режимі важливу роль відіграє точне супутникове позиціонування. В рамках проєкту розглянуто використання двох [29] GPS-модулів – u-blox NEO-6M [28], як бюджетного варіанту, та u-blox M8N [30] (див.рис.2.5), що забезпечує вищу точність і швидкість фіксації позиції.



Рисунок 2.5 – GPS приймач u-blox M8N [28]

Модуль NEO-6M є широко доступним GPS-приймачем, що забезпечує базову точність позиціонування для аматорських та напівпрофесійних дронів.

Проте в умовах щільного розміщення панелей, або при потребі точного позиціонування об'єктів для порівняльного аналізу з тепловізійними даними, точності NEO-6M може бути недостатньо.

Модуль u-blox M8N є більш сучасним GPS-приймачем з підтримкою декількох супутникових систем, що значно покращує точність та надійність навігації.

Даний модуль підтримує GNSS: GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, частоту оновлення: до 10 Гц, і має можливість використання RTK-методу з зовнішнім модулем для досягнення сантиметрової точності .

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Навідміну від NEO-6M має вищу точність позиціонування, швидке фіксування координат, особливо у складних умовах прийому, і сумісний з APM/Pixhawk через стандартні інтерфейси.

Цей модуль є оптимальним варіантом для задач, де важливо фіксувати точне місце зйомки тепловізійних зображень або синхронізувати маршрути обльоту з даними геопросторових інформаційних систем (ГІС).

Обидва модулі підтримуються контролером APM 2.8 через UART-інтерфейс. У польотному контролері визначаються ключові GPS-точки маршруту, по яких дрон автоматично виконує місію. У випадку використання GPS-даних у поєднанні з обробкою зображень, точність стає критично важливою, оскільки дозволяє визначати місце несправностей, формувати мапу дефектів та координувати повторні обльоти.

Під час польотів над сонячними електростанціями, розміщеними на великій площі, модуль M8N забезпечує стабільність навігації навіть у разі часткового затінення сигналу, що робить його кращим вибором для промислових застосувань.

ESP32 [32] – це високопродуктивний мікроконтролер з вбудованими Wi-Fi та Bluetooth-модулями, який часто використовується в IoT-рішеннях завдяки низькому енергоспоживанню та гнучким можливостям підключення.

Цей модуль має на борту двоядерний процесор Tensilica LX6 (до 240 МГц), підтримує Wi-Fi 802.11 b/g/n [33] та Bluetooth, а також має вбудовані інтерфейси UART, SPI, I²C, ADC, PWM.

Це ідеальне рішення для коротких дистанцій або роботи в зоні покриття Wi-Fi (наприклад, у межах СЕС із локальним маршрутизатором).

Однак радіус дії обмежений, тому ESP32 доцільно використовувати лише на початкових етапах тестування або для комунікації в межах невеликих територій.

SIM7600 – LTE-модем для мобільного зв'язку

Модуль SIM7600 (див.рис.2.6) забезпечує зв'язок через стільникові мережі (3G/4G) і підтримує передачу даних на великі відстані.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.6 – Модуль зв'язку SIM7600 [41]

SIM7600 підтримує LTE [34] CAT-1, UMTS/HSPA+ та GSM/GPRS, має ітерфейси USB, UART, GPIO і підтримує GNSS (GPS/GLONASS/BeiDou) .

Завдяки роботі через мережу оператора мобільного зв'язку має глобальне покриття, яке не залежить від локальної інфраструктури і має можливість передачі великих обсягів даних, включаючи зображення з камер;

SIM7600 – оптимальний вибір для віддаленого моніторингу великих СЕС, розташованих за межами доступу до Wi-Fi .

У цьому проєкті використано модуль SIM7600 (LTE) , оскільки він більше підходить під поставлене завдання.

Політний контролер є центральним елементом безпілотної авіаційної платформи, який забезпечує стабілізацію, навігацію та реалізацію автономних функцій БПЛА. У межах даного проєкту для реалізації управління польотом обрано контролер АРМ 2.8 (ArduPilot Mega 2.8) [35] – перевірене рішення з відкритим програмним забезпеченням, яке активно використовується у дослідницьких і навчальних проєктах.

Контролер АРМ 2.8 (див.рис.2.7) базується на мікроконтролері Atmel ATmega2560 та працює під управлінням прошивки ArduPilot (ArduCopter), що дозволяє реалізувати широкі можливості: ручне керування, стабілізацію, режим

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

утримання позиції, GPS-навігацію, автономні польоти за заданим маршрутом, повернення додому, а також підтримку телеметрії та різних типів навантажень.

АТmega2560 містить 256 КБ флеш-пам'яті для програмного коду, 8 КБ SRAM для оперативних обчислень та 4 КБ EEPROM для збереження постійних даних. Таке поєднання дозволяє зберігати складні програми керування польотом, а також логувати дані телеметрії та параметри калібрування. Процесор працює на тактовій частоті 16 МГц, що забезпечує достатню швидкість обробки сенсорних даних у режимі реального часу.

У прошивці автопілота (наприклад, ArduPilot [20]) АТmega2560 відповідає за обробку даних з IMU (інерціального вимірювального модуля), виконання алгоритмів стабілізації та навігації, прийняття рішень про зміну режимів польоту, а також керування ESC, сервоприводами та інтерфейсами зв'язку.

Контролер APM 2.8 оснащений усіма необхідними сенсорами для базової стабілізації польоту та навігації. Вбудований гіроскоп, акселерометр, магнітометр та барометр дозволяють визначати орієнтацію та висоту дрона в просторі. Наявність зовнішнього роз'єму для підключення GPS-модуля забезпечує можливість автономної навігації.



Рисунок 2.7 – Польотний контролер APM 2.8 [35]

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливістю моделі APM 2.8 є винесений модуль компаса, що суттєво зменшує вплив електромагнітних завад від елементів силової установки, зокрема ESC (Electronic Speed Controller) та безколекторних електродвигунів. Це підвищує точність орієнтації та стабільність у навігації дрона. Такий підхід вигідно відрізняє APM 2.8 від попередніх версій, зокрема APM 2.6, у яких компас був інтегрований безпосередньо в плату, що робило його більш вразливим до спотворення магнітного поля. Додатковою перевагою є можливість розміщення компаса на оптимальній відстані від джерел завад, наприклад, на "мачті" або на хвості дрона.

Система прошивки ArduPilot [22] надає широкі можливості налаштування контролера. До функціоналу належать параметри стабілізації та керування, обмеження по висоті, швидкості, зоні польоту (geofence), автоматичне повернення додому (Return to Launch), а також автоматизоване виконання місій (waypointмісії). Усе це реалізується через графічний інтерфейс програми Mission Planner, яка забезпечує налаштування, калібрування, моніторинг польоту в реальному часі та запис логів для подальшого аналізу.

Контролер APM 2.8 ідеально підходить для створення дослідницьких, навчальних або експериментальних платформ, де потрібне поєднання функціональності, гнучкості налаштувань і відносно невеликої вартості

Для забезпечення точного та динамічного керування безколекторними електродвигунами DJI 2212 використовується електронний регулятор швидкості (ESC, Electronic Speed Controller). Було обрано модель Afro ESC 30A [36] (див. рис. 2.8), яка відзначається високою точністю регулювання обертів, швидким відгуком та підтримкою частоти оновлення сигналу до 400 Гц. Це дозволяє досягти кращої стабільності дрона під час польоту, особливо при раптових змінах навантаження або напрямку руху.

ESC серії Afro сумісні з Li-Po акумуляторами 3S і 4S, що забезпечує достатній запас потужності для середньорозмірного квадрокоптера. Ці регулятори мають вбудований захист від перевантаження, перегріву та короткого замикання, що підвищує загальну надійність системи.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У поєднанні з APM 2.8, ці ESC дозволяють реалізувати ефективну систему керування рухом БПЛА, яка забезпечує точну стабілізацію платформи під час збору візуальних і термографічних даних із сонячних панелей, навіть за умов вітру або незначних змін маси дрона.



Рисунок 2.8 ESC- регулятор Afro ESC 30A [36]

ESC приймає керуючий сигнал від політного контролера, а також живлення від основного Li-Po акумулятора. На основі цих сигналів регулятор керує фазами живлення на трифазному двигуні, забезпечуючи точну зміну обертів у реальному часі.

Обрані ESC на 30 А ідеально підходять для роботи з безколекторними двигунами DJI 2212. Вони забезпечують стабільну подачу енергії, точне регулювання швидкості обертання та ефективну взаємодію з політним контролером APM 2.8.

2.2 Визначення програмної частини програмно-технічного засобу

Для реалізації функціональності кіберфізичної системи з декількома безпілотними літальними апаратами (БПЛА) для моніторингу стану сонячних панелей визначено три рівні – польотний, обчислювальний та серверний.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

встановлення параметрів failsafe функцій безпечного повернення дрона у разі втрати зв'язку або низького заряду акумулятора.

Однією з ключових функцій Mission Planner є можливість побудови польотних місій із заздалегідь визначеними контрольними точками (waypoints). За допомогою інтерактивної карти користувач може задати координати маршруту обльоту сонячних панелей, висоту польоту, швидкість та необхідні дії в кожній точці, наприклад, зупинку для фотофіксації або повернення на стартову позицію. Ці маршрути можуть бути збережені та завантажені повторно, що є особливо зручним при використанні кількох однотипних БПЛА.

Також програма дозволяє в режимі реального часу отримувати телеметричні дані з дрона: координати, висоту, швидкість, рівень сигналу GPS, заряд акумулятора, положення літального апарата на мапі. Це забезпечує зручний контроль як у ручному режимі, так і під час автоматичного виконання місій.

Mission Planner підтримує протокол MAVLink, що дозволяє інтегрувати його з іншими програмними засобами, зокрема з Python-бібліотеками DroneKit та MAVProху, які використовуються на бортовому комп'ютері Raspberry Pi для реалізації автономного керування та передачі даних на сервер.

У межах розробки кіберфізичної системи з кількома БПЛА, Mission Planner є ключовим інструментом, який забезпечує стабільну роботу апаратної платформи, просту конфігурацію, гнучке налаштування параметрів польоту, а також контроль виконання завдань обльоту у реальному часі. Його застосування дозволяє суттєво скоротити час налаштування та оптимізувати процес розгортання всієї системи.

Для реалізації ефективного обльоту великих площ сонячних панелей у складі кіберфізичної системи застосовується концепція групової роботи декількох безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Об'єднання дронів у єдину керовану групу дозволяє паралелізувати виконання завдань, зменшити час інспекції та підвищити надійність у випадку відмови одного з апаратів. Організація злагодженої роботи досягається за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення – Mission Planner у поєднанні з бібліотекою MAVProху та фреймворком DroneKit-Python.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Програмне середовище Mission Planner [38] виконує функції первинного планування місії, конфігурації параметрів кожного дрона, побудови маршрутів обльоту, зонального розподілу території та налаштування координованого запуску. Після створення індивідуального маршруту для кожного БПЛА дані завантажуються у відповідні автопілоти (АРМ 2.8), які підтримують протокол MAVLink.

Для координації групової взаємодії дронів у режимі реального часу застосовується MAVProху – командний інтерфейс до протоколу MAVLink, що дозволяє управляти декількома дронами одночасно через один наземний комп'ютер або одноплатник Raspberry Pi, підключений до мобільної мережі. MAVProху також підтримує ретрансляцію телеметрії, логування та керування через API.

Керування поведінкою кожного дрона, зокрема автоматичний старт, утримання на позиції, повернення, реагування на події (виявлення перегріву), здійснюється за допомогою скриптів на Python із використанням бібліотеки DroneKit-Python, яка дозволяє будувати інтелектуальні алгоритми навігації з урахуванням координат, часу та стану інших апаратів.

Комунікація між дронами може здійснюватися через центральний вузол (Raspberry Pi з SIM7600), що виступає як координатор місії, або безпосередньо між дронами у випадку реалізації mesh-мережі на базі модулів ESP-NOW чи радіомодемів (у рамках додаткової розробки). Однак у базовій конфігурації вся координація здійснюється через наземний центр управління, який послідовно передає команди кожному апарату.

Групова робота забезпечується синхронізацією маршрутів та запуском дронів із різними зонами покриття, які заздалегідь визначаються у Mission Planner або за допомогою скрипту Python, що ділить загальну територію на сектори та генерує місії у форматі .waypoints.

У запропонованій кіберфізичній системі АРМ 2.8 виконує функції стабілізації польоту, автоматичного керування маршрутом і обробки сигналів з

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На Raspberry Pi встановлюється Linux-дистрибутив (наприклад, Raspberry Pi OS або Ubuntu Server), на якому конфігуруються сервіси взаємодії з APM 2.8. Для автоматизації запуску програмного забезпечення при вмиканні дрона використовуються скрипти systemd або cron. Водночас Raspberry Pi виконує обробку даних із камер Sony IMX219 та FLIR Lepton 3.1R, використовуючи Python-бібліотеки OpenCV, numpy, picamera2, а також здійснює передавання даних на сервер через модем SIM7600.

Фізичне з'єднання APM 2.8 та Raspberry Pi здійснюється за допомогою UART-порту GPIO (з урахуванням рівнів напруги: APM працює на 5 В, Raspberry Pi – на 3,3 В, тому бажано використання рівнетвору), або альтернативно через USB-інтерфейс із використанням FTDI-адаптера. У системному середовищі Raspberry Pi порт визначається як /dev/ttyAMA0, /dev/serial0 або /dev/ttyUSB0 – залежно від способу підключення.

Інтеграція APM 2.8 з Raspberry Pi створює архітектуру «подвійного керування»: низькорівневе керування забезпечується прошивкою ArduCopter на APM, а високорівневе – через програмні модулі на Raspberry Pi. Це дозволяє реалізувати автономні польоти з динамічною зміною маршруту, виявленням аномалій на сонячних панелях, телеметрією в реальному часі та передачею даних на сервер для подальшого аналізу.

Таким чином, взаємодія між APM 2.8 і Raspberry Pi є критично важливою складовою реалізації функціональної та гнучкої кіберфізичної системи з можливістю розширення її інтелектуальних можливостей без компромісів щодо стабільності керування польотом.

Для реалізації візуального та тепловізійного моніторингу стану сонячних панелей у складі безпілотної кіберфізичної системи використовується двокамерна система, що включає в себе звичайну RGB-камеру Sony IMX219 та тепловізійну камеру FLIR Lepton 3.1R. Обидва модулі підключаються до одноплатного комп'ютера Raspberry Pi, який виконує функції збору, попередньої обробки та збереження візуальної інформації.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Камера Sony IMX219 є стандартним сенсором, що використовується з Raspberry Pi через інтерфейс CSI (Camera Serial Interface). Вона забезпечує роздільну здатність до 8 мегапікселів, підтримує відеозапис у форматах Full HD та 4K, а також має високу чутливість до світла, що дозволяє отримувати чіткі зображення навіть у складних умовах освітлення. Встановлення та налаштування камери здійснюється через середовище Raspberry Pi OS, а керування – з використанням бібліотек picamera2, libcamera або opencv-python. В автоматичному режимі зйомка запускається за таймером або при досягненні заданих координат GPS, що передаються від контролера APM.

Тепловізійна камера FLIR Lepton 3.1R використовується для фіксації теплових аномалій на поверхні сонячних панелей. Вона забезпечує тепловізійне зображення з роздільною здатністю 160×120 пікселів з абсолютною температурною точністю до ± 5 °C. Модуль підключається до Raspberry Pi за допомогою інтерфейсу SPI з використанням спеціального адаптера PureThermal 2 (див.рис.2.11)[37].



Рисунок 2.11 – Адаптер PureThermal 2 [37]

Для обробки даних із теплокамери застосовуються бібліотеки rulepton, spidev та numpy. Зображення з камери декодується у вигляді температурної

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матриці, яка візуалізується у формі теплової мапи та може бути збережена або передана через мережу.

Обидві камери працюють паралельно в одному польотному сеансі. Їхня взаємодія координується скриптами Python, які реалізують механізм одночасного захоплення зображень та прив'язки до координат маршруту. Усі знімки отримують метадані з GPS-приймача (модуль u-blox M8N), які зберігаються у вигляді EXIF-даних або окремих JSON-файлів. Це дозволяє здійснювати геоприв'язану інспекцію кожної ділянки сонячної панелі.

Таким чином, за рахунок об'єднання RGB- і тепловізійного аналізу на борту дрона досягається підвищення точності діагностики, що дозволяє не лише фіксувати візуальні дефекти, а й виявляти внутрішні температурні аномалії у режимі реального часу. Raspberry Pi виступає як універсальний процесор для обробки потоків даних з обох сенсорів, забезпечуючи ефективну інтеграцію в загальну архітектуру кіберфізичної системи.

У складі запропонованої кіберфізичної системи модем SIM7600 використовується для забезпечення мобільного зв'язку та передачі даних на сервер у реальному часі. Цей модем підтримує стандарти LTE, UMTS та GSM, що дозволяє реалізувати стійке з'єднання в умовах віддалених або розосереджених об'єктів, де немає фіксованої мережевої інфраструктури. У нашому випадку SIM7600 підключено до Raspberry Pi через USB-інтерфейс.

Для інтеграції модему використовуються утиліти ModemManager[40] та NetworkManager[39]. ModemManager забезпечує виявлення, керування та конфігурацію мобільного модему, включно з ініціалізацією SIM-карти, перевіркою стану мережі, активацією з'єднання та моніторингом параметрів передачі даних. У свою чергу, NetworkManager забезпечує спрощене керування мережевими інтерфейсами та автоматичне підключення до мережі.

Налаштування здійснюється у кілька етапів. Після встановлення обох компонентів (`sudo apt install modemmanager network-manager`), перевіряється наявність модему командою `mmcli -L`. Далі за допомогою `mmcli` створюється

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

профіль мобільного з'єднання, який використовує вбудовану SIM-карту з активним мобільним трафіком, а APN налаштовується відповідно до оператора мобільного зв'язку.

Після встановлення інтернет-з'єднання Raspberry Pi автоматично отримує доступ до зовнішнього сервера через стандартні TCP/IP протоколи. Передача даних реалізується з використанням протоколів HTTPS або MQTT. У випадку моніторингу стану сонячних панелей дані з камер (у форматах JPEG або CSV з температурними значеннями) та телеметрія (GPS-координати, швидкість, висота) передаються на хмарний сервер або обробляються через REST API.

ModemManager також дозволяє моніторити якість сигналу, швидкість передавання даних, рівень заряду SIM-карти та здійснювати перезапуск з'єднання у разі втрати мережі, що особливо важливо для забезпечення надійності під час автономних польотів.

Завдяки інтеграції SIM7600 з ModemManager та NetworkManager забезпечується стабільний, керований і автоматизований канал зв'язку між безпілотним апаратом та віддаленим сервером. Це дозволяє оперативно отримувати результати обстеження сонячних панелей без необхідності ручного збирання інформації після польоту, що є ключовою функцією для кіберфізичних систем моніторингу в реальному часі.

2.3 Висновки

У ході проєктування кіберфізичної системи з декількома безпілотними літальними апаратами для обльоту сонячних панелей було визначено склад та основні характеристики апаратної та програмної частин програмно-технічного засобу.

Такий вибір забезпечує комплексну реалізацію функцій автономного планування маршрутів, координації групової роботи дронів, збору та передачі телеметричних та сенсорних даних у режимі реального часу.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В результаті система має модульну, масштабовану архітектуру, що дозволяє інтегрувати кілька БПЛА в єдину мережу з координованою роботою та високою надійністю. Це забезпечує ефективний моніторинг стану сонячних панелей, автоматизацію процесів інспекції та значне підвищення продуктивності у порівнянні з традиційними методами.

Виконані апаратні та програмні рішення створюють основу для розробки, тестування та впровадження кіберфізичної системи з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей із GPS-навігацією, що відповідає вимогам сучасних інтелектуальних систем моніторингу інфраструктури.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ З ДЕКІЛЬКОМА БПЛА ДЛЯ ОБ'ЇЇТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З GPS НАВІГАЦІЄЮ

3.1 Апаратна реалізація кіберфізичної системи та алгоритм її роботи

Для оптимальної та безперебійної роботи усіх вузлів кіберсистеми було складено структурну схему (Рисунок 3.1).

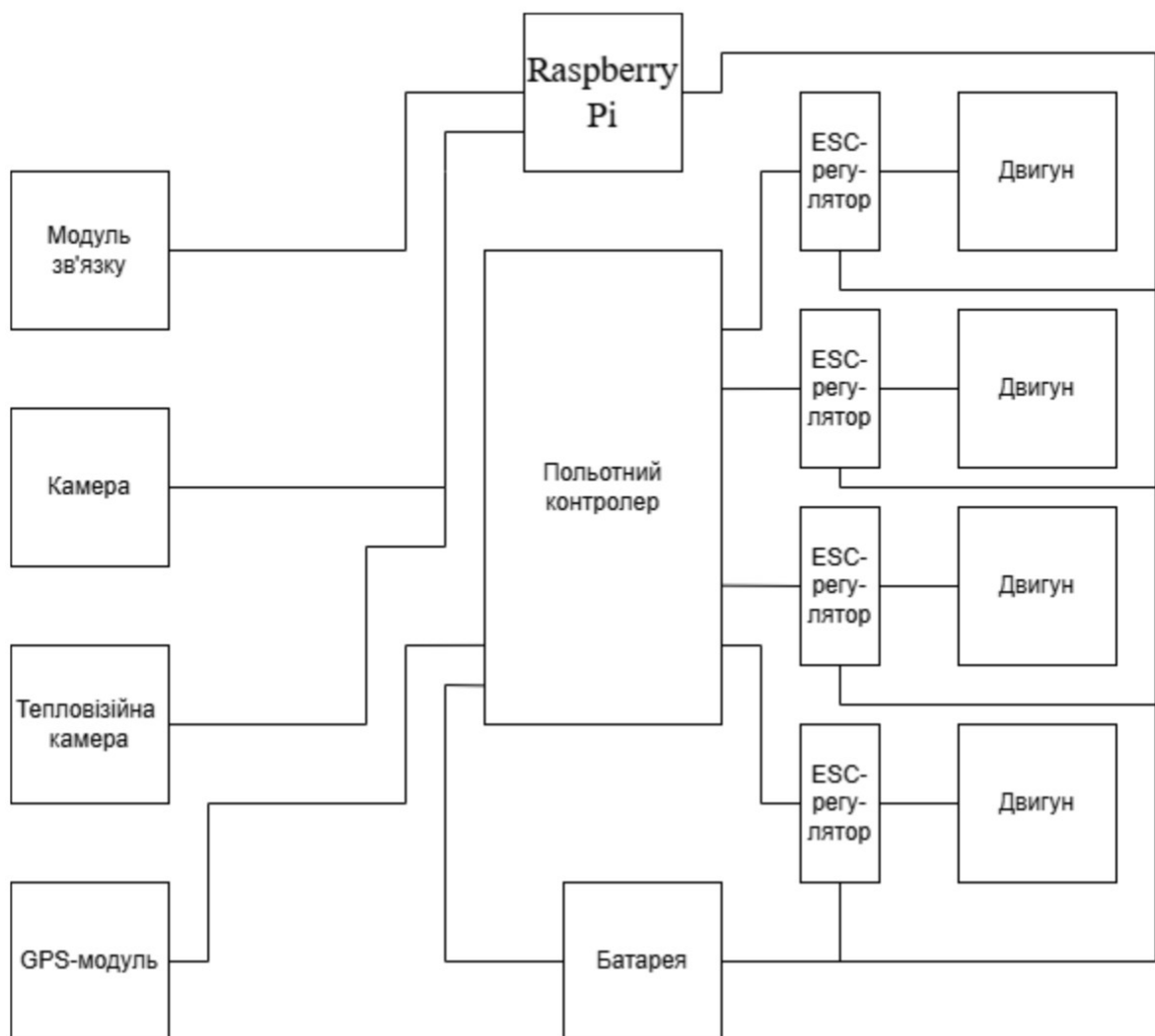


Рисунок 3.1 – Структурна схема БПЛА

Враховуючи вагові та енергетичні обмеження, компоненти системи підбираються з урахуванням ефективності споживання енергії, стабільності з'єднань, взаємної сумісності та антивібраційного монтажу.

Уся система монтується на рамі DJI F450, що складається з чотирьох плечей і центральної платформи. Кожне плече обладнане безколекторним електродвигуном DJI 2212, який через пропелер створює підйомну силу. До кожного двигуна підключається регулятор швидкості типу Afro ESC 30A, який відповідає за точне регулювання обертів мотора на основі сигналів від польотного контролера. ESC-регулятори з'єднуються з силовою розподільчою платою (PDB), що забезпечує живлення всіх компонентів від акумулятора LiPo 11.1В 3S. ESC також передають сигнали керування (PWM) до польотного контролера APM 2.8.

Контролер розміщується по центру рами на антивібраційній платформі. До нього підключаються чотири сигнали керування з ESC (канали 1–4), модуль GPS u-blox M8N через UART-порт GPS, а також компас, який вбудований у GPS-модуль – через I²C-порт. Після підключення GPS необхідно відкалібрувати компас і вимкнути вбудований у контролер, щоб уникнути перешкод і помилок.

У системі присутній одноплатний комп'ютер Raspberry Pi, який підключається через USB до порту телеметрії APM 2.8 для отримання та надсилання MAVLink-повідомлень. Також Raspberry Pi відповідає за обробку та передачу зображення з стандартної візуальної камери Sony IMX219, яка підключається до нього через роз'єм CSI, та тепловізійної камери FLIR Lepton 3.1R, яка потребує підключення до адаптера PureThermal 2, який комунікує з Raspberry Pi через USB, забезпечуючи передачу термальних зображень у форматі UVC або RAW.

До Raspberry Pi підключається модем SIM7600, який забезпечує мобільний зв'язок через LTE. За живлення відповідає стабілізатор напруги DC-DC типу 5В/3А, який отримує живлення з тієї ж PDB, що й ESC, і забезпечує стабільну подачу живлення на одноплатний комп'ютер і периферію.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структурно всі з'єднання реалізовані через стандартні конектори типу JST, XT60, Dupont, а для монтажу використовуються 3D-друковані адаптери, антивібраційні елементи, пластикові кріплення і кабель-менеджмент із термоусадкою та фіксаторами. Завдяки злагодженій роботі всіх апаратних елементів кіберфізична система досягає високого ступеня автономності, стабільності польоту, гнучкості обробки інформації та надійного зв'язку з оператором або зовнішніми інформаційними середовищами.

Для забезпечення автономної роботи системи критично важливим є правильний вибір джерела живлення. У цьому проєкті використовується літій-полімерний акумулятор типу 3S 11.1V ємністю 5000 мА·год з роз'ємом типу XT60. Такий акумулятор забезпечує достатню кількість енергії для одночасного живлення ESC, двигунів, польотного контролера, Raspberry Pi, камер та комунікаційних модулів. При піковому навантаженні сумарне споживання системи може досягати 60–70 Вт, тому важливо передбачити запас потужності мінімум на 20–30%.

Живлення розподіляється через силову розподільчу плату (PDB), до якої напряму підключаються ESC, а також DC-DC понижуючі перетворювачі, які стабілізують напругу до 5В для Raspberry Pi, PureThermal 2 та SIM7600. Для уникнення просадок напруги на вході Raspberry Pi використовується модуль живлення з запасом по струму не менше 3А, із фільтрацією та тепловим захистом.

Сам Raspberry Pi розміщується на двошаровому монтажному майданчику в центральній частині дрона, закріплюється на антивібраційних стійках та охолоджується пасивним радіатором з алюмінію. Температурний контроль важливий для запобігання тротлінгу процесора під час обробки зображень або передачі даних.

Акумулятор встановлюється по центру під основною платформою, камери – спереду. Raspberry Pi розташовується над польотним контролером, антени GPS - на телескопічній карбоновій штанзі в задній частині дрона. Це дозволяє змістити центр ваги до геометричного центру квадрокоптера, що покращує стабільність.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

GPS-модуль має активну антену, яка виноситься подалі від джерел перешкод, особливо від ESC і моторів. Антена SIM7600 підключається через SMA-конектор і кріпиться вертикально на пластику або вуглепластику. Виведення антен проводиться із захистом у вигляді феритових кілець на кабелях, щоб мінімізувати електромагнітні завади.

Кабелі з'єднань живлення ізолюються термоусадкою для надійної механічної фіксації та захисту від коротких замикань, вологи, пилу і пошкоджень, а також щоб уникнути випадкового контакту провідників, що може призвести до замикання або втрати живлення. Термоусадка щільно облягає ізоляцію кабелю, підвищуючи його міцність і стійкість до механічних впливів.

Сигнальні кабелі екрануються обплетенням або скручуванням для захисту від електромагнітних завад і шумів, які можуть спотворювати чутливі сигнали. Екранування перешкоджає проникненню зовнішніх радіочастотних і електромагнітних полів, а скручування пар дротів зменшує індуковані наведені струми, що виникають через різні джерела шуму. Це забезпечує високу якість і стабільність передачі сигналів, особливо важливо для точних вимірювань і керування в кіберфізичних системах.

Монтаж камери FLIR Lepton 3.1R з адаптером PureThermal 2 виконується у герметичному корпусі з прозорим ІЧ-вікном, щоб забезпечити захист від вологи, пилу і механічних пошкоджень. Усі конструктивні елементи кріпляться гвинтами з нержавіючої сталі, пластиковими втулками та амортизуючими шайбами, що дозволяє витримувати вібрації й механічні удари.

Уся апаратна частина розрахована на автономну роботу в польових умовах, включаючи температуру від -10 до $+45$ °C, вологість до 90%, вібрації та механічні коливання.

Алгоритм роботи кіберфізичної системи зображено на рисунку 3.2.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.2 – Алгоритм роботи кіберфізичної системи

Увімкнення кіберфізичної системи починається з підключення акумулятора, після чого напруга надходить на силову розподільчу плату, яка є основним вузлом енергопостачання для всіх компонентів бортової системи. Напруга з акумулятора подається безпосередньо на чотири електронні регулятори швидкості двигунів, а також проходить через DC-DC стабілізатор, що забезпечує необхідну напругу для живлення обчислювального модуля Raspberry Pi, адаптера для тепловізора та модуля мобільного зв'язку.

При подачі живлення ESC автоматично ініціалізуються, видаючи звукові сигнали, які підтверджують, що з'єднання з двигунами встановлено і пристрої готові до роботи. Ці сигнали формуються шляхом генерування коротких електричних імпульсів на обмотках двигунів, які працюють як звукові котушки. У цей же момент польотний контролер, який отримує живлення також через PDB, починає процес завантаження вбудованого програмного забезпечення та виконує самотестування. У ході ініціалізації контролер активує акселерометр, гіроскоп,

барометр та магнітометр, що входять до інерціальної навігаційної системи, і використовуються для стабілізації, орієнтації та контролю висоти дрона.

Одночасно з цим до АРМ підключені сигнали керування типу PWM, що виходять до ESC. Кожен канал PWM відповідає за управління швидкістю обертання окремого двигуна, реалізуючи базову функцію польоту квадрокоптера через зміну тяги на кожному з чотирьох плечей рами.

GPS-приймач отримує живлення від окремого виводу та починає прийом сигналів з навігаційних супутників, визначаючи точні координати, швидкість і висоту польоту. Після короткої затримки на початку роботи Raspberry Pi, отримавши стабілізоване живлення, починає завантаження з microSD-карти, де знаходиться операційна система. Після завершення завантаження запускається домен MAVProху, який встановлює MAVLink-з'єднання з польотним контролером через UART-інтерфейс. Завдяки цьому з'єднанню Raspberry Pi отримує телеметричні дані, включно з координатами, висотою, швидкістю, кутами нахилу, сигналами GPS та іншими параметрами польоту в режимі реального часу.

Камера ініціалізується драйвером і може бути використана для відеозйомки в реальному часі, або для періодичної фіксації зображень, які зберігаються або передаються на сервер. Тепловізійна камера працює через SPI-інтерфейс у зв'язці з адаптером PureThermal 2, який підключений до Raspberry Pi дозволяє перетворити дані з камери у доступний формат MJPEG. Після того, як Raspberry Pi завершив ініціалізацію всіх периферійних пристроїв, модем активується через AT-команди, передані через серійний інтерфейс. Після налаштування PDP-контексту модем встановлює стільникове з'єднання з оператором зв'язку, забезпечуючи канал зв'язку LTE для передачі телеметрії та зображень.

Після завершення етапу ініціалізації за допомогою програмного забезпечення Mission Planner на наземній станції відбувається підключення до АРМ 2.8, відбувається завантаження заздалегідь створеної місії з точками маршруту, висотами та командами польоту. Raspberry Pi може самостійно генерувати або коригувати маршрут, передаючи його до АРМ за допомогою

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

MAVLink-команд, у тому числі в режимі реального часу. Після старту місії дрон переходить у режим AUTO, в якому польотний контролер самостійно керує переміщенням дрона відповідно до Waypoint-маршруту. У процесі польоту APM постійно обробляє сигнали з IMU (інерціальної вимірювальної системи), щоб підтримувати стабільність та коректну траєкторію, надсилаючи відповідні сигнали PWM до ESC. ESC, в свою чергу, модулюють живлення, яке подається на обмотки двигунів, що змінює швидкість їх обертання і відповідно – положення дрона в просторі.

Raspberry Pi, отримуючи від GPS координати через APM, асоціює їх з відео-та тепловізійними кадрами, формуючи інформаційно-насичені знімки з прив'язкою до точних географічних координат. Ці зображення зберігаються у локальному сховищі і додатково передаються через LTE-з'єднання на серверну інфраструктуру, де можуть бути візуалізовані, оброблені або збережені. Якщо під час польоту сигнал LTE буде втрачено, система переходить у автономний режим, при якому усі зображення, телеметрія та службові повідомлення зберігаються локально на microSD Raspberry Pi, і дрон продовжує місію без втручання оператора.

Після завершення маршруту APM автоматично активує режим Return To Launch (RTL), який наказує БПЛА повернутися до початкової точки запуску, виконати посадку і завершити місію. Одразу після приземлення польотний контролер передає через MAVLink фінальне повідомлення про успішне завершення місії.

У процесі експлуатації кіберфізичної системи, до складу якої входять безпілотні літальні апарати, що здійснюють обльоти сонячних панелей, можуть виникати різноманітні проблеми, які суттєво впливають на якість та ефективність виконання завдань. Здебільшого ці проблеми пов'язані з технічними обмеженнями самої апаратури, нестабільністю зв'язку, несприятливими погодними умовами або зовнішніми радіоелектронними завадами. Особливе значення мають труднощі, які виникають під час автономних польотів, коли дрон виконує заздалегідь задану місію без постійного втручання оператора.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з найкритичніших і водночас найпоширеніших проблем, що можуть виникати під час польоту, є втрата навігаційного сигналу глобальної системи позиціонування. У системах, що покладаються на точне позиціонування для коректного проходження маршрутних точок, така втрата сигналу може призвести до суттєвих збоїв у логіці місії. Сигнал GPS може зникати або значно деградувати в основному через погодні умови – густі хмари, щільний дощ, туман чи снігопад здатні поглинати або розсіювати супутниковий сигнал, особливо на низьких висотах. Також на роботу сигналу GPS можуть впливати і високі будівлі, металеві конструкції, радіощогли або навіть щільні лісові масиви, які можуть відбивати сигнал, викликаючи ефект багатопроменевого поширення (multipath effect), коли дрон приймає затриманий і спотворений сигнал, що знижує точність позиціонування. У деяких регіонах або поблизу промислових об'єктів можуть діяти потужні джерела електромагнітного випромінювання, які спричиняють магнітні завади і порушують роботу GPS-приймача.

Втрата GPS для автономного БПЛА є критичною, адже саме завдяки цьому сигналу він отримує свої координати, курс руху, висоту, швидкість, напрямок, а також визначає виконання маршрутних точок (waypoints). У разі повної втрати сигналу дрон переходить в режим «Loiter», при якому він намагається утримувати останнє відоме місце польоту, стабілізуючись за допомогою інерціальних датчиків. Проблема в тому, що при тривалій відсутності сигналу або за низької точності INS (інерціальної навігаційної системи), дрон може помилково визначити своє положення і здійснити неконтрольований дрейф, змінити висоту польоту, або навіть зіткнутися з перешкодами. У найгіршому випадку це може призвести до аварії апарата або його втрати.

Важливо розуміти, що GPS є основним, але не єдиним сенсорним джерелом у сучасних дронах. В нашому польотному контролері інтегровані набори акселерометрів, гіроскопів, барометрів та компасів, які можуть слугувати резервним джерелом орієнтації. Проте тривале утримання стабільності лише на інерціальній навігації без зовнішнього корегування (GNSS чи візуальна навігація)

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

не гарантує точного позиціонування, особливо якщо траєкторія місії передбачає складні маневри чи обліт об'єктів з високою прецизійністю.

Ще однією поширеною проблемою є розрив або деградація зв'язку між дроном і наземною станцією, що особливо критично при використанні LTE або Wi-Fi. У районах зі слабким мобільним покриттям або за наявності великої кількості перешкод (наприклад, металеві конструкції, гірські масиви), передача даних може перериватися, що унеможлиблює надсилання телеметрії чи зображень на сервер.

Перегрів одноплатного комп'ютера Raspberry Pi або модемів у польоті є ще одною проблемою, яка спричиняє зависання системи або втрату доступу до камер.

Польоти в умовах воєнного стану суттєво ускладнюються через посилений контроль над повітряним простором, вимоги до реєстрації, а також ризики пов'язані з наявністю військової інфраструктури в зоні обльоту. Часто існують обмеження на використання безпілотників у певних районах, що ускладнює або унеможлиблює виконання запланованих місій. У таких умовах польоти мають здійснюватися з дотриманням строгих протоколів безпеки, з попереднім інформуванням військових чи відповідних органів, а маршрути повинні бути чітко узгоджені і максимально короткі. Крім того, польоти мають супроводжуватися логуванням усіх параметрів, щоб у разі необхідності можна було довести відсутність загрозового характеру місії. У випадках, коли місія виконується поблизу зон з інтенсивною військовою активністю, зростає ризик впливу на безпілотник спеціальних систем РЕБ.

Системи радіоелектронної боротьби (РЕБ) – це високотехнологічні засоби, які активно використовуються для перешкоджання функціонуванню БПЛА шляхом глушіння сигналів управління, навігації та передачі даних. Найбільш поширеними типами впливу є придушення сигналу GPS, при якому дрон втрачає орієнтацію у просторі, і глушіння каналів зв'язку (Wi-Fi, LTE, 433/915 MHz), що призводить до повної втрати зв'язку з оператором або сервером. Сучасні системи РЕБ можуть працювати у багатьох частотних діапазонах і автоматично визначати присутність БПЛА, після чого здійснюють радіочастотну атаку. Наслідком дії

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

таких систем є зупинка місії, примусове приземлення або навіть перехоплення контролю над дроном.

Для підтримки надійного зв'язку в умовах глушіння або слабкого покриття можливим рішенням є впровадження резервного дрона, який виконує роль ретранслятора або посилювача сигналу. Такий дрон позиціонується в точці, яка одночасно має візуальний контакт з основним дроном і прямий або підсилений канал зв'язку із сервером або базовою станцією. Для збільшення ефективності можна використовувати антену з направленим підсиленням на резервному дроні, що дозволяє розширити радіус дії в зонах з обмеженим LTE. Використання резервного дрона також актуальне у сценаріях, коли основний дрон виконує глибокий обліт, а наземний зв'язок неможливий через рельєф. Таким чином, резервний дрон стає ключовим елементом побудови стійкої до відмов кіберфізичної системи, здатної працювати навіть у зонах активного впливу РЕБ або при зниженій доступності зв'язку.

3.2 Програмна реалізація кіберфізичної системи

Важливим етапом налаштування є попередня конфігурація системи в Mission Planner. У програмі необхідно підключитися до APM через USB або телеметрію, перевірити правильність підключення ESC, провести калібрування акселерометрів, компаса, радіоуправління та ESC. У розділі «Initial Setup» конфігурується тип рами (X-квадрокоптер), напрямки обертання двигунів, мінімальні та максимальні значення сигналів ESC. Далі в розділі «Flight Modes» встановлюються режими польоту. (див.рис.3.3).

У розділі «Optional Hardware» активується підтримка телеметрії, компаса, зовнішніх GPS -модулів, а також UART-зв'язок із Raspberry Pi. Для інтеграції камер додатково налаштовується модуль Raspberry Pi, де встановлюються бібліотеки picamera2, pyserial, opencv-python, mavproxy і flirpy, які забезпечують

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відеозахоплення, обробку, надсилання через LTE і інтеграцію з системою управління.

На основі розширеного програмного забезпечення на Raspberry Pi формуються знімки з обох камер, накладаються геопросторові мітки з GPS та передаються через MQTT або REST API на сервер. Уся система призначена для роботи в реальному часі, де польотний контролер керує динамікою дрона, а Raspberry Pi відповідає за аналітику, комунікацію та взаємодію з наземними станціями чи хмарними сервісами.



Рисунок 3.3 – Встановлення польотних режимів

Перед калібруванням польотних режимів (Flight Modes) необхідно налаштувати апаратуру керування. Для цього вона спочатку прошивається на 10-ти канальний режим роботи. Далі на пульті у вкладках End points та Aux. channels, у яких встановлено параметри для 5-го каналу(див.рис.3.4) Це дозволить з використанням трипозиційного вимикача SwC та двопозиційного SwD працювати з 6-ма різними польотними режимами.

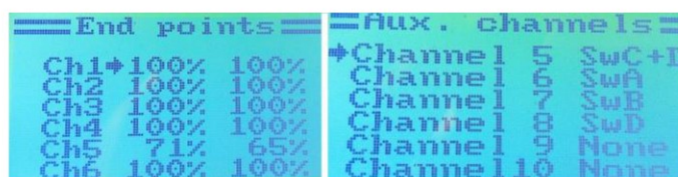


Рисунок 3.4 – Установка 5-го каналу

Вибирається прошивка APMCopter v3.3 Quad(Рисунок 3.5). Після завершення прошивки виконується підключення програми Mission Planner до прошивки контролера APM 2.8 і калібрується акселерометр, компас та апаратура управління(див.рис.3.6)

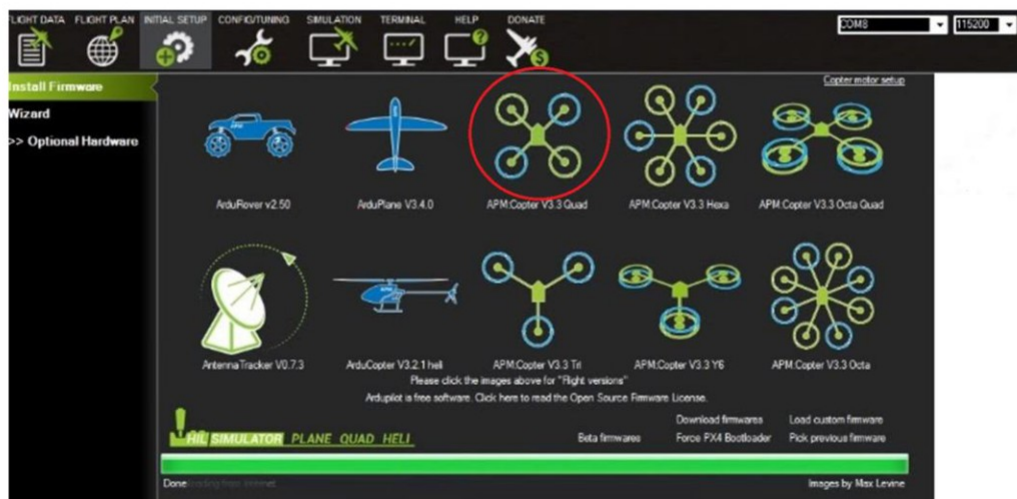


Рисунок 3.5 – Прошивка APM 2.8

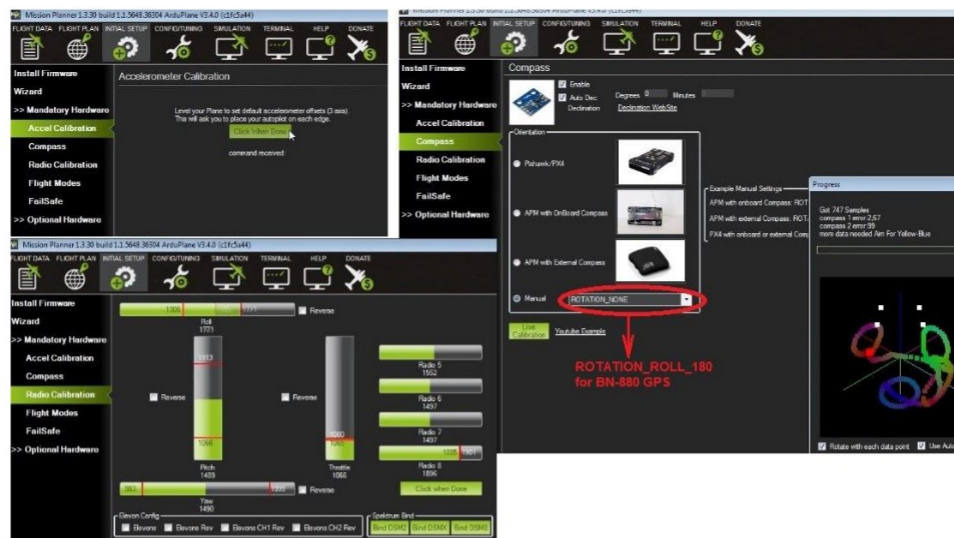


Рисунок 3.6 – Калібрування акселерометра, компаса та апаратури управління

Щоб БПЛА міг виконувати в політ по певній траскторії, повертатись в точку старту, виконувати задані дії, потрібно конфігуррувати GPS модуль. Потрібно підключити до USB виходу комп'ютера виходи RXD, TXD GPS модуля. В якості перехідника використаний USB TO TTL конвертер. Під час прошивки

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підключення здійснюється наступним чином: 5В на конвертері USB TO TTL підключаємо до вихода VCC GPS модуля; вихід RXD на конвертері до виходу TXD модуля; вихід TXD на конвертері до вихода RXD модуля; GND на конвертері аналогічно до вихода GND модуля.

З метою забезпечення незалежного керування та ідентифікації апаратів у системі MAVLink, кожному дрону призначено унікальний системний ідентифікатор: для UAV1 (першого БПЛА) параметр SYSID_THISMAV встановлено на значення 1, а для UAV2 (другого БПЛА) на значення 2. Це дозволяє Mission Planner ідентифікувати телеметричні потоки від кожного апарата окремо.

Перед початком групової роботи виконується поетапне підключення апаратів до наземної станції управління, де для кожного застосовується власний канал передачі телеметрії через COM-порти: COM3 для UAV1 та COM5 для UAV2, зі стандартною швидкістю обміну даними 57600 біт/с. Підключення обох апаратів виконується за допомогою внутрішньої функції Mission Planner через меню Ctrl + F, де активується інструмент MAVSerial.

Для кожного апарата вибирається свій COM-порт, після чого в основному інтерфейсі відображаються обидва дрони з можливістю швидкого перемикання між ними через вікно Telemetry. Далі потрібно перейти до налаштування маршрутів кожного БПЛА у вкладці Flight Plan. Для UAV1, який виконує роль лідера, задається маршрут із трьох контрольних точок: WP1 – старт з точки А, WP2 – проліт вздовж правого флангу досліджуваної території, WP3 – повернення до початкової позиції або до зони посадки. Для UAV2, який діє як відстежувальний або паралельний моніторинговий апарат, створюється альтернативний маршрут: WP1 – зліт з точки В, WP2 – проліт уздовж лівого флангу, WP3 – синхронізація з UAV1 у точці WP3 для координації завершення місії. Кожен маршрут записується на відповідний контролер через функцію Write WPS, при цьому необхідно стежити, щоб активний MAV ID відповідав потрібному апарату.

Після запису маршрутів БПЛА готуються до виконання автономної місії. Кожен з них переводиться в режим AUTO у вкладці Actions, після чого виконується

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

команда ARM (активація двигунів) для кожного апарата окремо. Запуск виконання місії ініціюється командою Start Mission, також окремо для кожного.

Одночасність старту забезпечується синхронізацією команд запуску з невеликою різницею у часі, що не перевищує 2–3 секунд, або через зовнішній скрипт для автоматизації. Під час виконання місії здійснюється візуальне спостереження за обома маршрутами на карті у вкладці Flight Data. Для покращення наочності можна активувати відображення траєкторій різними кольорами та увімкнути маркери з поточними координатами кожного апарата. Крім того, в режимі реального часу виводяться дані з IMU, GPS та бортових сенсорів, що дозволяє оператору аналізувати ситуацію та оперативно реагувати на відхилення.

Для забезпечення надійності польоту в БПЛА налаштовано системи аварійного захисту. Активовано функцію Failsafe (див.рис.3.7) у разі втрати зв'язку з наземною станцією (параметр FS_GCS_ENABLE = 1), встановлено граничні значення напруги батареї, при досягненні яких виконується повернення додому або посадка (FS_BATT_VOLTAGE), а також активовано контроль навігаційної помилки (FS_EKF_THRESH)(Рисунок 3.8), що дозволяє вчасно реагувати на помилки в системі позиціонування. Кожен політ автоматично записується у вигляді телеметричних логів (tlog-файли), які містять дані з усіх сенсорів, маршрутів, команд управління та реакцій системи на зміну умов. Ці логи можуть бути проаналізовані після польоту для оцінки точності виконання місії, визначення відхилень або збоїв, а також для статистичного аналізу координат руху.

Окремі ідентифікатори MAVLink у log-файлі дозволяють розділяти інформацію по кожному апарату окремо. З огляду на функціональні можливості, такий підхід до організації групового польоту БПЛА дозволяє забезпечити ефективну реалізацію моніторинг сонячних панелей. Така архітектура може бути масштабована до більшої кількості апаратів із використанням IP-телеметрії через модулі SIM7600 та доповненням автоматизованих сценаріїв запуску через скрипти

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

MAVProxy або ROS, що підвищує ступінь автономності й гнучкості системи в польових умовах.



Рисунок 3.7 – Установка FailSafe

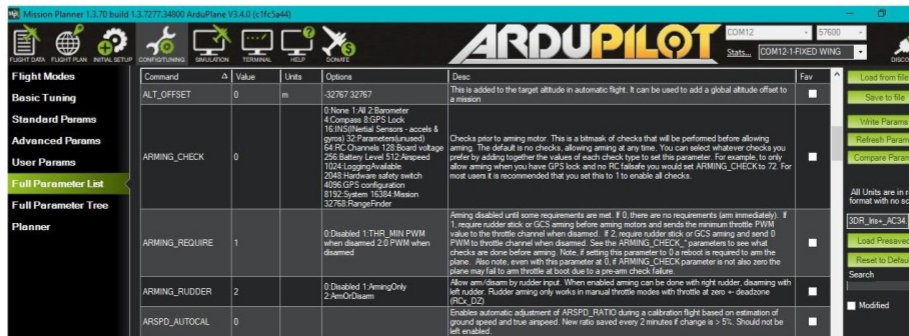


Рисунок 3.8 – Вкладка установки параметрів

Далі виконується запуск програмного забезпечення U-Center. Вибирається необхідний порт, до якого підключений модуль. (див.рис.3.9)



Рисунок 3.9 – Встановлення порту у ПЗ U-Center

Камера Sony IMX219 підключається до Raspberry Pi через стандартний інтерфейс CSI, що розташований поруч із HDMI-портом. Далі у системі необхідно активувати камеру командою `sudo raspi-config`, обрати пункт Interface Options, потім Camera і дозволити її використання. Після перезавантаження камера буде доступна для роботи з бібліотекою `opencv-python`. Скрипт для перевірки зображення з камери наведено на рисунку 3.12.

```
26 cap = cv2.VideoCapture(0)
27 while True:
28     ret, frame = cap.read()
29     if not ret:
30         break
31     cv2.imshow("Sony IMX219", frame)
32     if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
33         break
34 cap.release()
35 cv2.destroyAllWindows()
```

Рисунок 3.12 – Python-скрипт для перевірки зображення з камери

Тепловізійна камера FLIR Lepton 3.1R потребує адаптера PureThermal 2, який підключається до Raspberry Pi через USB-порт. PureThermal 2 працює як USB Video Class (UVC) пристрій, тобто визначається як вебкамера. Для початку роботи потрібно встановити бібліотеки `ruvc` або `opencv-python` і звертатися до камери як до другого відеопристрою (`/dev/video1` або `1` у `VideoCapture`). Скрипт для перевірки зображення з тепловізійної камери зображено на рисунку 3.13

```
45 cap = cv2.VideoCapture(1)
46 while True:
47     ret, frame = cap.read()
48     if not ret:
49         break
50     frame = cv2.applyColorMap(frame, cv2.COLORMAP_JET)
51     cv2.imshow("FLIR Lepton 3.1R", frame)
52     if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
53         break
54 cap.release()
55 cv2.destroyAllWindows()
```

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.13 – Python-скрипт для перевірки зображення з тепловізійної камери

Модуль зв'язку SIM7600 підключається до Raspberry Pi через USB. Модуль автоматично реєструється як /dev/ttyUSB0, /dev/ttyUSB1 тощо. Для зв'язку з SIM7600 використовуються бібліотеки типу pyserial. Для перевірки підключення використовується скрипт, наведений на рисунку 3.14.

```
66 ser = serial.Serial('/dev/ttyUSB2', 115200, timeout=1)
67 time.sleep(2)
68 ser.write(b'AT\r')
69 print(ser.readline())
70 ser.write(b'AT+CSQ\r')
71 print(ser.readline())
72 ser.write(b'AT+CREG?\r')
73 print(ser.readline())
74 ser.close()
```

Рисунок 3.14 – Python-скрипт для перевірки підключення модуля зв'язку

Оскільки наш модуль підтримує передачу даних через мобільну мережу, то встановлюється PPP-з'єднання або використовується модемний режим через Modemmanager. Для автоматизованої передачі зображень з камер на сервер застосовується MQTT протокол. В нашому випадку, можна періодично знімати зображення з камери та тепловізора, зберігати на Raspberry Pi і надсилати на віддалений сервер по мобільному інтернету, реалізуючи моніторинг стану сонячних панелей у реальному часі. Уся система програмно координується скриптом Python, який одночасно ініціалізує обидві камери, зберігає кадри з температурним аналізом, а також виконує відправку знімків за допомогою MQTT повідомлення.

Для розгортання серверної частини на Flask, яка буде приймати, зберігати та візуалізувати зображення з декількох БПЛА, необхідно створити веб-сервер(див.рис.3.15), який містить API-ендпоінт для прийому файлів (HTTP POST), логіку для організації зберігання зображень у структурованих директоріях відповідно до ідентифікаторів БПЛА та часового штамп, а також веб-інтерфейс

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для перегляду отриманих зображень у браузері. Для цього підходить легкий веб-фреймворк Flask, який дозволяє швидко реалізувати REST API та HTML-інтерфейс. Цей сервер може одночасно приймати зображення від декількох дронів, кожен з яких ідентифікує себе через параметр `bpla_id`. Кожне зображення зберігається у відповідному підкаталозі.

На Raspberry Pi створюється скрипт Python, який ініціалізує обидві камери, знімає кадри з певною періодичністю (наприклад, кожні 10 секунд або у відповідь на команду), зберігає зображення в тимчасову директорію у форматі JPEG, виконує компресію для економії трафіку та відправляє файли на віддалений сервер за допомогою HTTP POST-запиту(див.рис.3.16).

```
83 app = Flask(__name__)
84 UPLOAD_FOLDER = '/home/user/uploads'
85 os.makedirs(UPLOAD_FOLDER, exist_ok=True)
86
87 @app.route('/upload', methods=['POST'])
88 def upload():
89     file = request.files['image']
90     filename = file.filename
91     filepath = os.path.join(UPLOAD_FOLDER, filename)
92     file.save(filepath)
93     return 'OK', 200
94
95 app.run(host='0.0.0.0', port=5000)
```

Рисунок 3.15 – Python-скрипт для серверного застосунку Flask

```
101 cap = cv2.VideoCapture(0)
102 ret, frame = cap.read()
103 if ret:
104     filename = f'/home/pi/temp_{datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")}.jpg'
105     cv2.imwrite(filename, frame, [cv2.IMWRITE_JPEG_QUALITY, 70])
106 with open(filename, 'rb') as f:
107     r = requests.post('http://<SERVER_IP>:5000/upload', files={'image': f})
108     print('Response:', r.status_code)
109 cap.release()
```

Рисунок 3.16 – Python-скрипт для надсилання зображення з Raspberry Pi на віддалений сервер Flask

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Візуалізація виконується через HTML-інтерфейс, що дозволяє наземному оператору переглядати всі зображення з конкретного БПЛА, оновлені в реальному часі. Такий сервер можна запустити на ноутбучі або на окремому сервері, який має публічну IP-адресу або динамічний DNS, до якого БПЛА мають доступ через мобільну мережу. Для безпеки в реальних умовах потрібно додати авторизацію, шифрування з'єднання (HTTPS), обмеження доступу до API та ведення журналу подій. У такому вигляді Flask-сервер є ефективною базовою платформою для прийому й моніторингу даних з кількох безпілотників, що виконують обльоти сонячних електростанцій.

Щоб налаштувати передачу зображення з камер, на наземний сервер у реальному або майже реальному часі, необхідно реалізувати надійний канал зв'язку, формувати дані для передачі, налаштувати програмне середовище на борту дрона та на сервері і забезпечити стійкість каналу до обривів. Наземний сервер на базі Flask приймає зображення, зберігає їх у базі даних або файлової системі та візуалізує через веб-інтерфейс. На Raspberry Pi підключення до інтернету через SIM7600 налаштовується за допомогою ModemManager.

Для цього підключається модем до Raspberry Pi через USB-порт. Після фізичного підключення модем автоматично з'являється у системі як набір пристроїв `/dev/ttyUSB0`, `/dev/ttyUSB1` та інших, які відповідають різним функціональним каналам: для AT-команд, даних, GPS тощо. Далі слід встановити програмне забезпечення ModemManager, яке забезпечує взаємодію з мобільними модемами через інтерфейс Dbus. Після запуску служби ModemManager вона автоматично виявляє підключені модеми та ініціалізує зчитування інформації про них. У відповідь система має виявити модем SIM7600 як пристрій, який підтримує GSM/UMTS/LTE зв'язок, а також має активну SIM-карту. Після виявлення модему слід переконатися, що мобільна мережа доступна в зоні дії та що модем зареєструвався у мережі оператора. Далі створюється профіль мобільного з'єднання, в якому вказується APN, наданий мобільним оператором. APN залежить від оператора зв'язку, наприклад, для Київстар це може бути `www.kyivstar.net`, для

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Vodafone – internet, а для Lifecell – internet. Після створення профілю GSM-з'єднання його можна активувати, що призводить до встановлення PPP або QMI-сесії через інтерфейс модему. Після активації інтерфейсу операційна система отримує IP-адресу, маршрут за замовчуванням і DNS-сервери, і Raspberry Pi починає використовувати мобільне з'єднання як основне джерело доступу до мережі Інтернет. У цей момент можна виконувати передачу даних, телеметрії або зображень у реальному часі через мобільну мережу. У випадку перезавантаження Raspberry Pi профіль з'єднання зберігається і може бути автоматично активований під час старту системи, забезпечуючи стабільне підключення без втручання користувача.

У разі правильного підключення модем забезпечує стабільний доступ до Інтернету через стільникову мережу 3G або 4G та може бути використаний як основний канал зв'язку БПЛА з наземною інфраструктурою в умовах, де інші способи підключення відсутні.

Для отримання теплового зображення застосовується VideoCapture(1) і зображення додатково обробляється для кольорової візуалізації з використанням `cv2.applyColorMap(...)`. За допомогою таймера або нескінченного циклу скрипт періодично повторює захоплення і передачу кадрів. Якщо зображення великі, або передбачається надсилання потокового відео, використовують MJPEG або RTMP через `ffmpeg`, так як у нас мобільні канали з обмеженою швидкістю, потрібно надсилати окремі кадри. Також реалізовано просту REST API, яка дозволяє серверу запитувати останнє зображення або ініціювати зйомку через команду GET/POST.

Щоб зменшити затримку та збільшити стабільність, можна зменшити роздільну здатність кадру до 640×480 або 320×240 . На сервері зображення автоматично обробляються, можуть відображатись у реальному часі або накопичуватись у сховищі.

					КвРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Висновки

У конструкції реалізовано баланс між міцністю, гнучкістю і компактністю, що дозволяє пристрою ефективно виконувати свою роботу в польових умовах. Успішно вирішено питання енергозабезпечення, просторового розташування елементів та обміну даними. Значна увага приділена захисту елементів від зовнішнього впливу, а також забезпеченню безперервності роботи у випадку порушень зв'язку чи несприятливих обставин.

У результаті вдалося досягти не лише високої точності та ефективності роботи, але й автономності, що мінімізує необхідність постійного контролю з боку людини. Система демонструє стабільність навіть за умов змінного середовища, а її здатність до накопичення та передачі інформації відкриває широкі можливості для подальшого аналізу і використання отриманих даних.

У процесі реалізації описаного комплексу робіт було досягнуто повноцінне узгодження всіх компонентів системи, кожен з яких виконує свою функцію в межах спільної задачі. Під час етапів налаштування особливу увагу приділено взаємодії між керуючими елементами, передачею інформації та обробкою даних у стислі терміни. Досягнуто ефективного поділу обов'язків між окремими апаратними та програмними складовими, що дозволило забезпечити злагоджену координацію руху літальних апаратів, стабільну передачу зображень та контроль параметрів у польоті.

Структура системи дозволяє не лише здійснювати обльоти у напівавтоматичному режимі, а й гнучко масштабувати її під більшу кількість пристроїв, ураховуючи вимоги до збереження автономності та точності. Оптимізовано засоби зв'язку та передавання зображень, що важливо для забезпечення роботи в умовах нестабільного покриття. Завдяки модульності підхід легко адаптується до інших сценаріїв моніторингу, а реалізовані заходи щодо безпеки та резервування підвищують надійність системи загалом.

Таким чином, побудована система відповідає ключовим вимогам до сучасних кіберфізичних платформ.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження підтвердило доцільність та ефективність використання дронів у сфері технічного обслуговування енергетичної інфраструктури. Такий підхід демонструє значні переваги у порівнянні з традиційними методами як за швидкістю обробки великих територій, так і за точністю виявлення дефектів.

Застосування декількох БПЛА з термографічними та візуальними сенсорами дозволяє реалізувати паралельну роботу, автоматичний розподіл маршрутів та ефективний збір даних у реальному часі. Завдяки цьому досягається висока продуктивність, знижується енергоспоживання, мінімізуються ризики збоїв і значно покращується якість технічної діагностики.

Проектування враховувало сучасні тенденції цифрової трансформації, у систему інтегровано високоточні засоби навігації, модулі для обробки сенсорних даних, алгоритми інтелектуального аналізу. Це забезпечило стабільну координацію групових польотів, автономне прийняття рішень і здатність до навчання та адаптації в умовах змінного середовища.

Апаратна частина системи вирізняється раціональним розташуванням компонентів, захистом від зовнішніх впливів, енергоефективністю та можливістю гнучкої модифікації. Програмні засоби забезпечують стабільний зв'язок між усіма вузлами, обробку великого обсягу даних та передачу інформації з мінімальними затримками. Впроваджена модульна архітектура дозволяє масштабувати систему, додаючи нові функції або дрони без потреби повного перепроєктування.

Загалом реалізована система відповідає вимогам до автономності, надійності, енергоефективності та розширюваності, що робить її придатною для широкого впровадження в галузі енергетики. Створена платформа формує надійну основу для подальших інновацій у сфері моніторингу і сприяє підвищенню ефективності експлуатації сонячних електростанцій та зменшенню негативного впливу на довкілля.

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Duan R., Ma Z. A method for detecting photovoltaic panel faults using a drone equipped with a multispectral camera. *ISPRS Cannals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2024. Vol. X-1-2024. P. 59–65.

2. Park J., та ін. Automatic Detection System of Deteriorated PV Modules Using Drone with Thermal Camera. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 11. Article 3802. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/11/3802> (дата звернення: 04.05.2025)

3. Di Tommaso A., та ін. A Multi-Stage model based on YOLOv3 for defect detection in PV panels based on IR and Visible Imaging by Unmanned Aerial Vehicle. *arXiv preprint*. 2021. arXiv:2111.11709. URL: <https://arxiv.org/abs/2111.11709> (дата звернення: 05.05.2025)

4. SG Drones. Technical inspections of photovoltaic panels with drones. URL: <https://sgdrones.es/en/drone-blog/technical-inspections-of-photovoltaic-panels-with-drones/> (дата звернення: 05.05.2025)

5. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. Cyber-Physical Systems for Predictive Production Systems. *CIRP cannals*. 2015. Vol. 64, No. 1. P. 767–770. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.001> (дата звернення: 006.05.2025)

6. Mohammadi M., Al-Fuqaha A., Sorour S., Guizani M. Deep Learning for IoT Big Data and Streaming Analytics: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. Vol. 20, No. 4. P. 2923–2960. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8359288> (дата звернення: 08.05.2025)

7. Kumar R., Sharma A., Kaur S. Drone-based monitoring system for solar farms using artificial intelligence and IoT. *Solar Energy*. 2021. Vol. 224. P. 1100–1110. URL: https://www.researchgate.net/publication/390824875_Integrated_IoT_and_Machine_Learning_System_for_Solar_Energy_Monitoring_on_Small_Farms (дата звернення: 11.05.2025)

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Zhou Y., Pan D., Zhang Z. A review of GPS and alternative positioning technologies in UAV applications. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 23. Article 7952. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/23/7952> (дата звернення: 22.05.2025)

9. Mohamed N., Al-Jaroodi J. Applications of Drones and UAVs in Industry 4.0: A Review. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 105451–105466. URL: https://www.researchgate.net/publication/336847887_Applications_of_unmanned_aerial_vehicles_a_review (дата звернення: 19.05.2025)

10. Yang S., Xu Z., Yao S., Xu W. Cooperative path planning for multi-UAVs in solar panel inspection systems. *International Journal of Robotics and Automation*. 2020. Vol. 35, No. 4. P. 461–470. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/11/654> (дата звернення: 23.05.2025)

11. Gao C., та ін. A hierarchical multi-UAV cooperative framework for infrastructure inspection and reconstruction . *Control Theory and Technology*. 2024. Vol. 22, No. 2. P. 123–135. URL: <https://doi.org/10.1007/s11768-024-00202-0> (дата звернення: 12.05.2025)

12. Tan Y., та ін. Building information model (BIM) and UAV-integrated method for automatic inspection data collection . *Journal of Building Performance*. 2021. Vol. 12, No. 2. P. 45–58. URL: <https://journals.sfu.ca/jbp/index.php/jbp/article/view/323> (дата звернення: 25.05.2025)

13. Kuang S., та ін. Real-time UAV path planning for large-scale building inspection. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 16820–16830. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10045678> (дата звернення: 21.05.2025)

14. Averroes AI. Complete Drone Solar Panel Inspection Guide 2025. URL: <https://averroes.ai/blog/drone-solar-panel-inspection-guide> (дата звернення: 14.05.2025)

15. u-blox NEO-6 series. URL: <https://www.u-blox.com/en/product/neo-6-series> (дата звернення: 22.05.2025)

16. MAVLink Protocol. URL: <https://mavlink.io/en/> (дата звернення: 10.05.2025)

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. OpenCV Documentation. URL: <https://docs.opencv.org/> (дата звернення: 11.05.2025)
18. Raspberry Pi Documentation. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation> (дата звернення: 12.05.2025)
19. DroneKit-Python. URL: <https://dronekit-python.readthedocs.io/> (дата звернення: 21.05.2025)
20. PX4 Autopilot User Guide. URL: <https://docs.px4.io/> (дата звернення: 13.05.2025) (дата звернення: 25.05.2025)
21. Bistué J., Pérez J.L., Pozzi P., Solar Panel Inspection Using Drones and AI. *Renewable Energy Technologies Journal*. 2021. Vol. 15. P. 22–28.
22. ArduPilot Documentation. URL: <https://ardupilot.org/> (дата звернення: 21.05.2025)
23. Raspberry Pi Foundation. Camera Module V2 Specifications. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-v2> (дата звернення: 22.05.2025)
24. Sony Semiconductor Solutions. IMX219 Product Brief. – Tokyo: Sony Corp., 2020. 6 с.
25. Gade R., Moeslund T. Thermal cameras and applications: A survey. *Machine Vision and Applications*. 2014. Vol. 25. P. 245–262.
26. Zhang Z., Wang L., Application of thermal imaging UAVs for fault detection in photovoltaic systems. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 2231–2242.
27. Bevilacqua P., Giampietri E. UAV-based thermographic inspections of PV plants: Integration of thermal and RGB images. *Energies*. 2022. Vol. 15(5): 1834.
28. u-blox. NEO-6 Data Sheet – GPS.G6-HW-09005. – u-blox AG, 2021. – 28 с. URL: <https://www.u-blox.com/en/docs/UBX-13003221> (дата звернення: 09.05.2025)
29. Darian S., Hesse R. GPS modules for UAV-based monitoring systems. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 2020. Vol. 8(2). P. 95–102.

30. u-blox. NEO-M8 Series Data Sheet – GNSS.M8-HW-15005. – u-blox AG, 2022. 32 с. URL: <https://www.u-blox.com/en/product/neo-m8-series> (дата звернення: 11.05.2025)

31. Wang Z., Song Q., UAV-assisted thermal monitoring and GPS-tagging of PV panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 160:112266.

32. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. Ver. 4.0, 2020. 635 с. URL: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> (дата звернення: 11.05.2025)

33. Kulkarni S., Patil M. Wi-Fi based drone communication for real-time monitoring. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2021. Vol. 10(5). – P. 72–75.

34. Tang L., Zhou H. LTE connectivity for UAV monitoring systems: A field performance analysis. *Sensors*. 2022. Vol. 22(10): 3816. DOI: 10.3390/s22103816. (дата звернення: 22.05.2025)

35. Польотний контролер Ardupilot APM 2.8 URL: <https://arduino.ua/prod1134-polotnii-kontroler-ardupilot-apm-2-8?srsId=AfmBOorJeV2K1dPFF5tpzaI2n56LXt9asIxeLyOT7fdidaFNsaEU5C6P> (дата звернення: 11.05.2025)

36. Afro 30A Race Spec Mini ESC w/BEC. URL: https://hobbyking.com/en_us/afro-30a-race-spec-mini-esc-w-bec.html?__store=en_us (дата звернення: 21.05.2025)

37. PureThermal2-FLIRLeptonSmartI/OBoardURL: <https://robosavvy.co.uk/purethermal-2-flir-lepton-smart-i-o-board.html> (дата звернення: 16.05.2025)

38. Ardupilot mission planner. URL: <https://ardupilot.org/planner/> (дата звернення: 22.05.2025)

39. Modemmanager. URL: <https://modemmanager.org/> (дата звернення: 15.05.2025)

40. Networkmanager. URL: <https://networkmanager.dev/> (дата звернення: 11.05.2025)

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

41. Модуль зв'язку SIM7600E-H LTE Cat-4 4G/3G/2G, GNSS для Raspberry Pi, Jetson Nano. URL: <https://arduino.ua/prod3020-modyl-svyazi-im7600e-h-lte-cat-4-4g3g2g-gnss-dlya-raspberry-pi-ot-waveshare> (дата звернення: 25.05.2025)

42. DJI 2212 E300 Motor CW. URL: <https://stockrc.com/es/881-dji-2212-e300-motor-cw.html> (дата звернення: 18.05.2025)

43. DJI F450 Quadcopter: A Versatile & Elegant Multirotor. URL: <https://www.mydronelab.com/reviews/dji-f450-quadcopter.html> (дата звернення: 14.05.2025)

44. Real-Time Kinematic (RTK) methods. URL: https://www.researchgate.net/figure/Real-Time-Kinematic-RTK-methods_fig5_297716315v (дата звернення: 13.05.2025)

45. Introduction to Simultaneous Localization and Mapping | SLAM | Kudan global. URL: <https://www.kudan.io/blog/lidar-simultaneous-localization-mapping-an-introduction/> (дата звернення: 22.05.2025)

46. DJI Matrice 200 V2. URL: <https://dronecenter.ua/kvadrokopter-dji-matrice-200-v2> (дата звернення: 25.05.2025)

47. eBee X mapping drone - Drones | AgEagle Aerial Systems Inc. URL: <https://ageagle.com/drones/ebee-x/> (дата звернення: 25.05.2025)

					КВРКІ 022027.22.02.24 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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: Ігор ВИСОЦЬКИЙ

Співавтор:

Назва: Висоцький_Кіберфізична система з декількома БПЛА для обльоту сонячних панелей з GPS навігацією

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 3.4%

Коефіцієнт подібності 2: 0.6%

Мікропробіли: 6

Заміна букв: 3

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-15 07:01:16.0

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 процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-06-15

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational**The maximum coincidence with one document 1.0%**

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 13%

ID: 245904 Title: БКР Кіберфізична система з декількома БПЛА для об'єкту сонячних панелей з GPS навігацією Added in a DB: 2025-06-15 Authors: Ігор ВИСОЦЬКИЙ Heads: Олег САВЕНКО Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	95193	648	1358 (1%)	19 (3%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Висоцький Ігор Павлович

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

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень ___ 3 ___ Кількість сторінок записки ___ 63 ___

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою дипломної роботи є створення прототипу кіберфізичної системи, здатної забезпечувати автономний моніторинг сонячних панелей із використанням декількох БПЛА та GPS-технологій

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

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі кваліфікаційної роботи був проведений аналіз структурних, функціональних та технологічних особливостей кіберфізичної системи з декількома БПЛА, орієнтованої на інспекцію сонячних електростанцій та перспективність такого підходу в умовах цифрової трансформації енергетичної галузі.

У другому розділі в ході проектування кіберфізичної системи було визначено склад та основні характеристики апаратної та програмної частин програмно-технічного засобу вибір якого забезпечує комплексну реалізацію функцій автономного планування маршрутів, координації групової роботи дронів, збору та передачі телеметричних та сенсорних даних у режимі реального часу.

У третьому розділі було досягнуто повноцінне узгодження всіх компонентів системи, кожен з яких виконує свою функцію в межах спільної задачі. Досягнуто ефективного поділу обов'язків між окремими апаратними та програмними складовими, що дозволило забезпечити злагоджену координацію руху літальних апаратів, стабільну передачу зображень та контроль параметрів у польоті.

4. Позитивні сторони роботи: Дослідження вирізняється високим ступенем практичного застосування та впровадженням передових технологій. У результаті вдалося досягти не лише високої точності та ефективності роботи, але й автономності, що мінімізує необхідність постійного контролю з боку людини.

5. Негативні сторони роботи: Залежність системи від ємності акумулятора унеможлиблює довготривалі польоти без дозарядки, що обмежує ефективність при обльоті великих територій. Також система потребує точного калібрування та ручного конфігурування, що робить її складною для недосвідчених операторів

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.

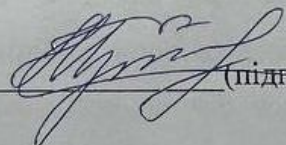
8. Інші зауваження: не має

9. Оцінка дипломної роботи: добре

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

Граворська Наталія Іванівна, доцент кафедри
ТЛЗ, к.тед.наук

“16” 06 2025 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри КПС
д-р. філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ
Ігоря ВИСОЦЬКОГО
ПІВ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2с-22-1

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.

15.06.2025 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, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

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

Автор: Висоцький Ігор

Спеціальність: 123– Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Савенко Олег Станіславович д.т.н. проф

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:

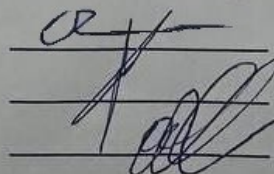
- 1) Запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи.;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) окремі збіги представлені загальноживаними фразами, наприклад: «на рисунку зображено», «загальна структура системи», «висновки до розділу» тощо.
- 4) Якість запозичень відповідає технічним особливостям дослідження: виявлено збіги в кодах, формулах і термінах, які є вихідними даними до великої кількості задач і не можуть вважатися авторськими порушеннями.
- 5) Система зафіксувала технічні модифікації тексту, зокрема: заміну окремих символів , скорочення індексів у формулах, зміну розміщення символів. Це є наслідком форматування або експорту документа, а не цілеспрямованого уникнення перевірки.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 3.35% і адресується до 25 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, 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