

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень


Адаптивна система планування траєкторій БПЛА для обльоту лопатей
вітроенергетичних установок з урахуванням погодних умов
Назва теми

КВРКІ 022013.22.01.37 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  Андрій ЗАДВОРНИЙ
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник  Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО
Підпис, дата Ініціали, прізвище

Нормоконтролер  Тетяна КИСІЛЬ
Підпис, дата Ініціали, прізвище

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

 Ольга ПАВЛОВА
Підпис Ініціали, прізвище

«2» 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

Андрію ЗАДВОРНОМУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Адаптивна система планування траскторій БПЛА для обльоту лопатей вітроенергетичних установок з урахуванням погодних умов

Керівник проекту (роботи) Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО, д.ф.

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

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.06.2025 р.

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

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

Аналіз проблем та існуючих підходів до інспекції вітроенергетичних установок та постановка задачі що до її удосконалення

Архітектура кіберфізичної системи адаптивного планування траскторій БПЛА для обльоту лопатей вітроенергетичних установок та систем метеоаналізу

Програмно-апаратна реалізація системи адаптивного планування траскторій БПЛА для обльоту лопатей ВЕУ з урахуванням погодних умов

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

Архітектура системи адаптивного планування траскторії

Архітектура системи метеоаналізу

Блок-схема програмного забезпечення

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 напряму дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2025	виконано
3	Робота над розділом 1 – теоретичні проблеми досліджуваної проблеми	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – архітектура системи адаптивного планування траєкторії БПЛА для об'єкту лопатей вітроенергетичних установок з урахуванням погодних умов	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація та тестування кіберфізичної системи	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

Андрій ЗАДВОРНИЙ
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Адаптивна система планування траєкторій БПЛА для обльоту лопатей вітроенергетичних установок з урахуванням погодних умов».

Автор роботи: Андрій ЗАДВОРНИЙ.

Керівник роботи: Мельниченко Олександр Вікторович.

Пояснювальна записка: 82 с., 31 рис., 10 табл., 4 дод., 50 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.


АДАПТИВНЕ ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЙ, ТЕХНОЛОГІЇ АВТОНОМНОГО КЕРУВАННЯ, ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТНИХ МІСІЙ, СИСТЕМНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕПЕЧЕННЯ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ БПЛА.

Метою дипломної роботи є покращення ефективності обльоту БПЛА лопатей вітроенергетичних установок шляхом розробки адаптивної системи планування траєкторій, що враховує погодні умови.

Об'єктом дослідження є процес обльоту БПЛА компонентів вітроенергетичних установок, зокрема лопатей.

Предметом дослідження є алгоритми, засоби та технології побудови адаптивних траєкторій польоту БПЛА з урахуванням погодних умов.

Під час проведення цього дослідження було використано метод систематичного аналізу літератури для дослідження тематичної області з джерел текстової інформації.






Підпис студента

30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	4
ВСТУП	6
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ	8
1.1 Аналіз особливостей обльоту БПЛА вітроенергетичних установок	8
1.1.1 Особливості конструкції ВЕУ та планування обльоту	8
1.1.2 Типові траєкторії обльоту вітроенергетичних установок за допомогою БПЛА.....	10
1.2 Вибір БПЛА для інспекції ВЕУ	15
1.2.1 Загальні критерії вибору БПЛА для інспекції ВЕУ	15
1.2.2 Аналіз сучасних моделей БПЛА та вибір оптимального рішення під поставлену задачу	16
1.3 Висновки до першого розділу.....	22
2 АРХІТЕКТУРА КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ БПЛА ДЛЯ ОБЛЬОТУ ЛОПАТЕЙ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З УРАХУВАННЯМ ПОГОДНИХ УМОВ	24
2.1 Апаратне забезпечення системи адаптивного планування.....	24
2.1.1 Льотна платформа	24
2.1.2 Навігаційна система.....	25
2.1.3 Система управління та передачі даних	27
2.1.4 Сенсорне обладнання.....	29
2.1.5 Вбудоване обладнання для моніторингу погодних умов	31
2.1.6 Наземна платформа управління.....	32
2.2 Програмне забезпечення кіберфізичної системи	33
2.2.1 Програмна бібліотека Detectron2.....	34
2.2.2 Бібліотека програмних інструментів OpenCV	36
2.2.3 Програмне забезпечення екосистем DJI та ПІД-регулятора	38
2.3 Архітектура модуля метеоаналізу для адаптації траєкторії	40

КвРКІ 022013.22.01.37 ПЗ								
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Адаптивна система планування траєкторій БПЛА для обльоту лопатей вітроенергетичних установок з урахуванням погодних умов ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		ЗАДВОРНИЙ		30.05.25		у	2	82
Перевір.		МЕЛЬНИЧЕНКО		30.05.25				
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		30.05.25				
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		30.05.25				
					ХНУ КІ2с-22-1			

2.4 Висновки до другого розділу	45
3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ	47
3.1 Реалізація модуля метеоаналізу та інтеграція сенсорів моніторингу погодних умов.....	47
3.2 Реалізація системи адаптивного планування та слідування траєкторії для обльоту лопатей ВЕУ	55
3.3 Результати тестування кіберфізичної системи у віртуальному середовищі.....	67
3.4 Висновки до третього розділу	69
ВИСНОВКИ.....	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	73
ДОДАТОК А	79
ДОДАТОК Б	80
ДОДАТОК В	81
ДОДАТОК Г.....	82

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БПЛА – Безпілотний літальний апарат.

ВЕУ – Вітроенергетична установка.

ПЗ – Програмне забезпечення.

3D – Тривимірний.

ІЧ – Інфрачервоний.

ОС – Операційна система.

ККД – Коефіцієнт корисної дії.

RTK (Real-Time Kinematic) – Кінематика реального часу.

PPK (Post-Processing Kinematic) – Кінематична з постобробкою.

GPS (Global Positioning System) – Глобальна система позиціонування.

IP (Ingress Protection) – Ступінь захисту оболонки.

RGB (Red, Green, Blue) – Червоний, Зелений, Синій (колірна модель).

LIDAR (Light Detection and Ranging) – Лазерний локаатор.

SDK (Software Development Kit) – Набір для розробки програмного забезпечення.

API (Application Programming Interface) – Інтерфейс прикладного програмування.

IMU (Inertial Measurement Unit) – Інерційний вимірювальний блок.

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – Одночасна локалізація та картографування.

GNSS (Global Navigation Satellite System) – Глобальна навігаційна супутникова система.

FAIR (Facebook AI Research) - Дослідницький підрозділ Facebook зі штучного інтелекту.

MASK R-CNN (Mask Region-based Convolutional Neural Network) – Згорткова нейронна мережа на основі масок та регіонів.

CNN (Convolutional Neural Network) – Згорткова нейронна мережа.

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

FPN (Feature Pyramid Network) – Мережа пірамід ознак.

RPN (Region Proposal Network) – Мережа пропозицій регіонів.

PID (Proportional-Integral-Derivative) – Пропорційно-інтегрально-диференційний (регулятор).

DL (Deep Learning) – Глибоке навчання.

PSDK (Payload SDK) – Набір для розробки корисного навантаження.

CAD (Computer-Aided Design) – Система автоматизованого проектування.

USB (Universal Serial Bus) – Універсальна послідовна шина.

LED (Light-Emitting Diode) – Світлодіод.

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) – Універсальний асинхронний приймач-передавач.

I2C (Inter-Integrated Circuit) – Внутрішньосхемний інтерфейс.

SPI (Serial Peripheral Interface) – Послідовний периферійний інтерфейс.

DC-DC (Direct Current to Direct Current) – Постійний струм в постійний струм (перетворювач).

									Арк.
									5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ				

ВСТУП

У сучасний час вітроенергетичні установки є невід'ємною частиною енергосистеми України. У той ж час, 13 серпня 2024 року Уряд затвердив Нацплан дій з відновлюваної енергетики до 2030 року, який передбачає побудову ВЕС на загальну потужність 6,1ГВт. Саме тому потреба в автоматизованому, безпечному та точному моніторингу ВЕС буде тільки зростати. Серед усіх компонентів системи найбільш критичними є лопаті, які зазнають постійне механічне навантаження та вплив навколишнього середовища. Інспекція цих елементів потребує цих елементів потребує високої точності та гнучкості у планування траєкторії огляду ВЕС.

Метою дипломної роботи є покращення ефективності обльоту БПЛА лопатей вітроенергетичних установок шляхом розробки адаптивної системи планування траєкторій, що враховує погодні умови. Такий підхід дозволяє досягти вищого рівня точності збору інспекційних даних, зменшити ризики пошкодження обладнання та підвищити загальну надійність системи.

Об'єктом дослідження виступає процес обльоту БПЛА компонентів вітроенергетичних установок, зокрема лопатей.

Предметом дослідження є алгоритми, засоби та технології побудови адаптивних траєкторій польоту БПЛА з урахуванням погодних умов.

Завдяки своїм властивостям, адаптивне планування дозволяє враховувати мінливі параметри зовнішнього середовища, що забезпечує безпечне проходження складних маршрутів в умовах обмеженого простору навколо турбіни. Застосування таких систем є особливо актуальним у випадках, коли інспекція повинна проводитись без призупинення роботи установки або в умовах обмеженого доступу людини.

Ще одним важливим аспектом роботи є розробка та оптимізація програмного забезпечення, що реалізує адаптивне планування маршруту з урахуванням вхідних метеоданих. Вивчення різних режимів застосування цієї системи дозволяє обрати

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

оптимальні стратегії для забезпечення точності, гнучкості та безпеки польоту БПЛА в реальних умовах експлуатації.

Запропонований підхід має перспективи використання у вітроенергетиці, промислового моніторингу, а також у ширшому контексті автономної навігації безпілотних систем у складних зовнішніх умовах.

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ

1.1 Аналіз особливостей об'єкту БПЛА вітроенергетичних установок

1.1.1 Особливості конструкції ВЕУ та планування об'єкту

Вітроенергетичні установки (ВЕУ) – це споруди інженерного характеру для перетворення кінетичної енергії вітру на електроенергію. Для успішної інспекції ВЕУ засобами БПЛА необхідно чітко розуміти їх конструкцію та геометричні особливості. Загальна будова ВЕУ зображена на рисунку 1.1.

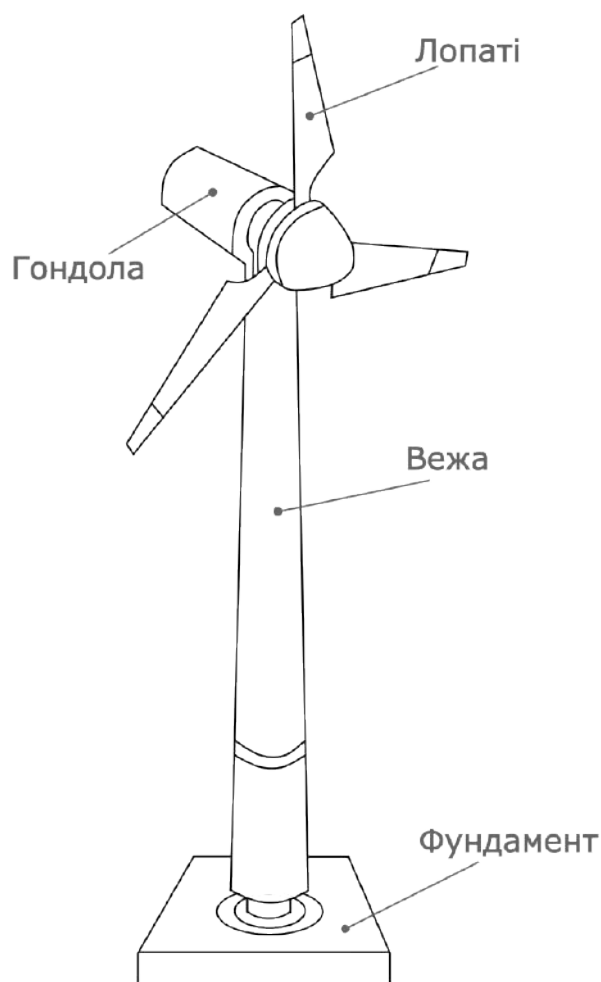


Рисунок 1.1 – Загальна будова ВЕУ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Основними конструктивними елементами ВЕУ є: лопаті, вежа, гондола, фундамент. Лопаті – є найбільш динамічно навантаженими та найважливішими елементами вітроенергетичної установки. Довжина лопатей на сучасних моделях сягає до 60-80 м. Вони мають складну аеродинамічну форму. Лопаті постійно зазнають зміни навантаження від вітрового потоку що зумовлює у них появу втомних пошкоджень, поверхневих дефектів, тріщин та ерозії країв. Також на поверхні лопатей можуть міститись численні малі елементи такі як: сенсори, антикрила, напрямні ребра, які також потрібно детально інспектувати. Лопаті можуть змінювати кут атаки під час роботи, за допомогою системи Pitch Control, що також потрібно врахувати під час планування місії обльоту.

Вежа – масивна вертикальна конструкція висотою 60 – 150 м, на якій закріплена гондола та лопаті. Часто виготовлена зі сталі або залізобетону, поверхня башти може мати стики сегментів та доступні для обслуговування місця. Під час інспекції потрібно приділяти увагу вежі, тому, що вона може мати тріщини, деформації або наявну корозію.

Гондола – містить основні механізми для генерації енергії такі як: генератор, редуктор, гальмо, сервоприводи встановлення лопатей, обтічник ротора, систему керування. Також обладнаний флюгером для моніторингу напрямку поривів вітру, та сервоприводом для повороту гондоли за напрямком вітру для найкращої ефективності. Розташовується у верхній частині вежі та має обтічну форму для зменшення впливу аеродинамічного опору. Вона також часто обладнана люками, різноманітними сенсорами, платформами для обслуговування внутрішнього обладнання та системами охолодження.

Фундамент – для великих установок будуть бетонні або палі-фундаменти, які можуть бути частково оголеними для технічного обслуговування.

Планування інспекції навколо ВЕУ має враховувати ряд особливостей що впливатимуть на безпеку місії та якість інспекції. Одним із найважливіших факторів є наявність рухомих частин: лопаті можуть коливатись або обертатись під дією вітру, що створюватиме ризик зіткнення БПЛА під час обльоту і як результат

									КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						9

пошкодження БПЛА або лопатей ВЕУ. Великий розмір установки потребуватиме ретельного планування масштабу, відстані та висоти обльоту для забезпечення повного охоплення конструкції під час місії без втрати якості фото або відеофіксації. Додатковою небезпекою під час обльоту буде турбулентність що виникає поблизу башти та лопатей, викликаючи непередбачувані зміни напрямку потоків повітря. Також слід врахувати оптичні перешкоди: блискучі поверхні лопатей і башти можуть призвести до помилок у роботі сенсорів БПЛА та зниження якості візуальної інформації зібраної під час місії. Погодні умови такі як дощ, обмерзання поверхонь або нагрів конструкції у сонячну погоду можуть змінювати фізичні характеристики поверхонь що позначиться на візуальній інформації зібраної термальною камерою БПЛА і як наслідок зниження ефективності виявлення дефектів та стабільність польоту. З усього цього виникає що успішна інспекція потребує комплексного підходу з урахуванням геометричних, так і фізичних властивостей конструктивних елементів вітроенергетичних установок.

1.1.2 Типові траєкторії обльоту вітроенергетичних установок за допомогою БПЛА

Ефективна інспекція ВЕУ за допомогою БПЛА вимагає чіткого планування траєкторії польоту для забезпечення повного охоплення досліджуваного об'єкта, високої якості знімків та безпеки апарата та установки. Існує кілька типів траєкторій що застосовуються в практиці обльоту ВЕУ:

Спіральний обліт навколо башти та лопатей. БПЛА рухається по траєкторії спіралі, навколо башти поступово змінюючи висоту. Такий маршрут дозволяє отримати повну картину стану поверхні башти, гондоли, лопатей, по усій висоті конструкції.

						КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			10

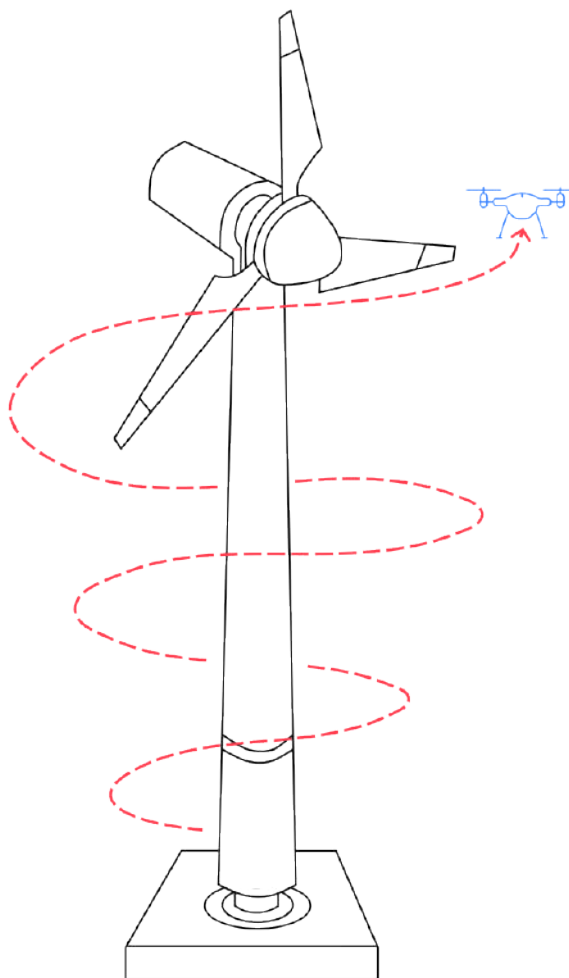


Рисунок 1.2 – Траєкторія спірального обльоту навколо башти та лопатей

Перевагами цього методу є безперешкодне охоплення досліджуваного об'єкта без пропусків та «мертвих зон», оптимальна дистанція для фіксації. Недоліками є необхідність висока точність стабілізації та навігації та підвищений ризик в умовах турбулентності.

Лінійна сегментована інспекція. Політ виконується горизонтальними або вертикальними площинами (сегментами) з суворо визначеними інтервалами. Кожен сегмент фіксується окремо що надалі дозволить скласти цифрову модель об'єкта дослідження (3D модель).

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРКІ 022013.22.01.37 ПЗ

Арк.

11

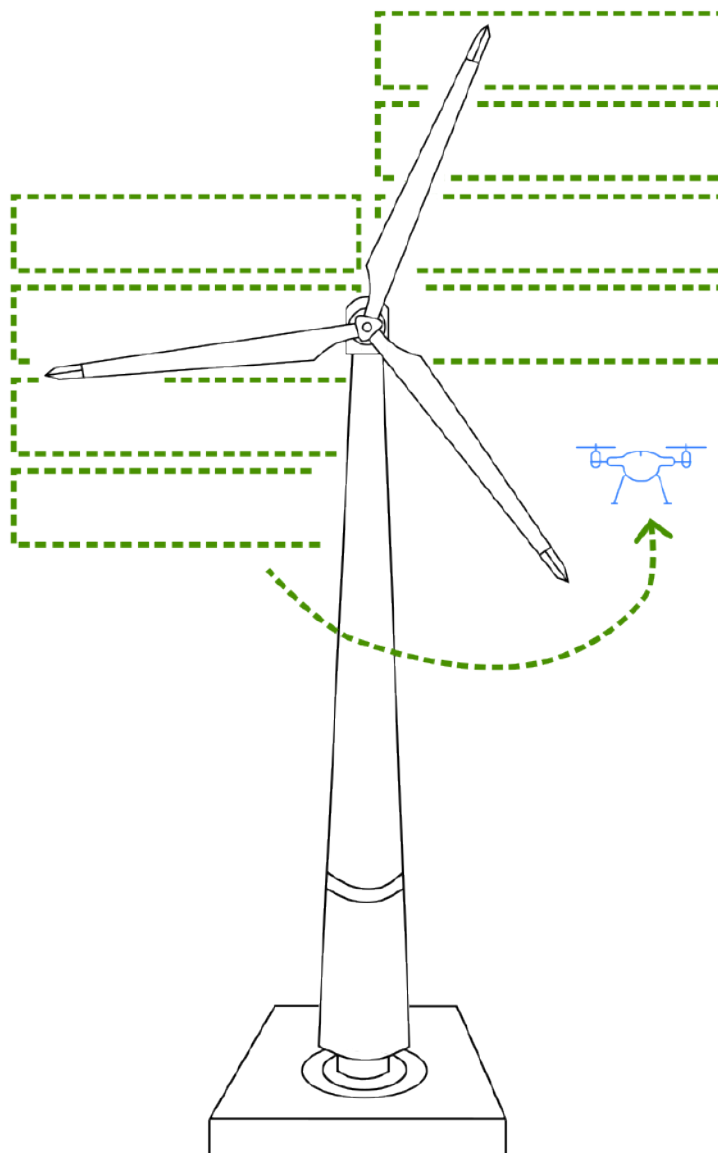


Рисунок 1.3 – Лінійно сегментована інспекція

Перевагами є автоматизація цього методу та цей метод ідеально підходить для фотограмметрії та побудови точної цифрової 3D моделі. Недоліками будуть потреби додаткової обробки та об'єднання великої кількості знімків та не можливо захопити усю інформацію у важкодоступних зонах.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Обліт кожної лопаті окремо. Траєкторія формується уздовж профілю кожної окремої лопаті, починаючи від кореня і до кінчика. БПЛА рухається паралельно лопатей, рівновіддалено.

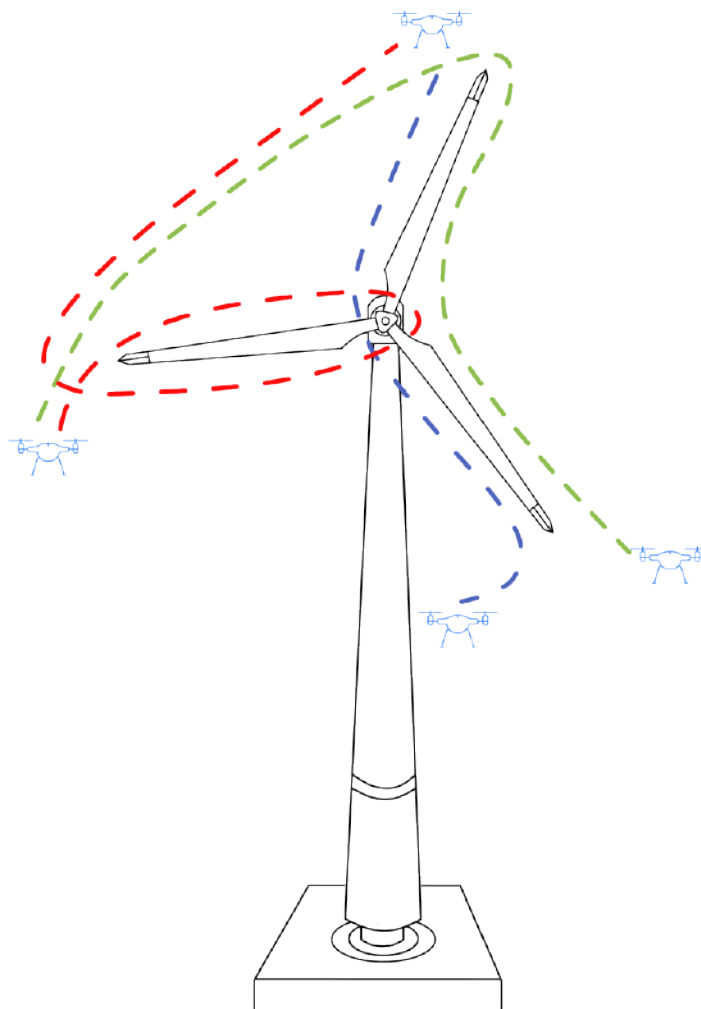


Рисунок 1.4 – Траєкторія обльоту окремо кожної лопаті

Перевагами є висока деталізація дефектів лопатей та можливість огляду важкодоступних місць на предмет корозії або тріщин. Недоліками буде необхідність враховувати кут лопатей під час польоту. Цей метод також вимагає складної адаптації траєкторії польоту до форми лопатей об'єкта місії.

На основі даних сформуємо порівняльну таблицю яка міститиме час дослідження, покриття досліджуваного об'єкта, відхилення та рівень автоматизації (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняння траєкторій обльоту БПЛА

Метод	Час дослідження	Покриття об'єкта	Середнє відхилення	Рівень автоматизації
Спіральний обліт	Середній	Високе	Низьке	Частковий
Лінійна сегментована інспекція	Середній	Середнє	Середнє	Повний
Обліт кожної лопаті окремо	Високий	Дуже високе	Низьке	Ручний

Таким чином, проаналізувавши чинні методи побудови траєкторій для інспекції вітроенергетичних установок дозволяє зробити висновок, що кожен з вище розглянутих методів як свої переваги, так і недоліки.

Спіральний обліт навколо башти та лопатей забезпечує повне охоплення досліджуваного об'єкта з мінімальним ризиком пропуску дефектів, але вимагає високої точності керування літальним апаратом, ретельного планування місії, врахування погодних умов, особливо в умовах сильного вітру.

Лінійно сегментована інспекція дозволяє детально та систематично покрити велику площу поверхні за чітко визначеними маршрутами, що спрощує подальшу обробку даних, але може бути менш ефективною у випадках складної геометрії об'єкта.

Обліт кожної лопаті окремо дозволяє забезпечити високий рівень інспекції окремих елементів турбіни дозволяючи максимально адаптувати траєкторію до форми лопаті, однак потребує складнішого планування місії та більших затрат часу.

1.2 Вибір БПЛА для інспекції ВЕУ

1.2.1 Загальні критерії вибору БПЛА для інспекції ВЕУ

Вибір безпілотного літального апарату для інспекції вітроенергетичних установок є найголовнішим завданням при плануванні місії що впливає на безпеку та якість візуальних даних. Через специфіку таких об'єктів – великі габарити, розташування на відкритій місцевості, висоту башти від 100 метрів і вище, а також на вплив погодних умов БПЛА має відповідати ряду технічних та функціональних вимог. Ключовими для вибору є наступні вимоги: стійкість до вітру та погодних умов, точність позиціонування, якість та гнучкість сенсорного бортового обладнання, автоматизація місій, система уникнення перешкод, час польоту, сумісність із ПЗ для обробки даних.

Стійкість до вітру та погодних умов. Зазвичай ВЕУ розміщені у відкритих та вітряних місцевостях, тому БПЛА має бути стабільний у польоті при швидкості вітру не менше 10 – 12 м/с., а для професійного використання – до 15 м/с. Також важливим аспектом є вологостійкість БПЛА для польоту в умовах дощу або снігу. З цього випливає що апарат має бути вологозахищений по стандарту IP-04 (Захист від дощу. Вода ллється вертикально або під кутом до 60° до вертикалі)

Точність позиціонування. Для забезпечення точного обльоту на близькій відстані до лопатей та башти ВЕУ необхідна навігація високої точності. Оптимальним вибором є апарати з підтримкою RTK/PPK GPS, що дозволяє знизити похибки позиціонування до сантиметрів. Також важливим фактором у виборі навігації є підтримка стабілізації в умовах слабкого GPS (наприклад поблизу металевих об'єктів).

Якість та гнучкість сенсорного бортового обладнання. Залежно від цілей інспекції ВЕУ (візуальна оцінка, пошук пошкоджень, виявлення термічних дефектів) обираються відповідні сенсори: RGB камери високої роздільної здатності (20MP і більше) для візуальної інспекції. Тепловізори для виявлення перегрівів і

						КвРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			15

прихованих дефектів. LIDAR-сенсори для створення цифрової моделі об'єкта. Мультиспектральні камери для оцінки стану поверхні (наприклад уразливість до корозії).

Автоматизація місій. Наявність програмного забезпечення для планування автономних польотів значно спрощує роботу оператора, знижує ризик втрати літального апарату або пошкодження БЕУ та забезпечує повторюваність результатів досліджень. Підтримка SDK/API дозволяє створювати власні сценарії або інтегрувати в складніші системи обробки даних.

Система уникнення перешкод (Obstacle Avoidance). Оскільки інспекція передбачає польоти поблизу лопатей, башт кабелів та інших конструкцій, критично важливою є наявність сенсорів уникнення перешкод у кількох напрямках. У деяких моделях є реалізація виявлення перешкод 360°, що дозволяє використовувати їх у складних середовищах без втрати рівню безпеки.

Час польоту. Залежно від обраної траєкторії обльоту та площі огляду важливим також буде час польоту на одному заряді – від 30 до 45 хвилин від одного акумулятора. Зміна акумулятора у польових умовах або швидке заряджання буде перевагою, адже забезпечить інспекцію без довгих перерв на підзаряджання акумулятора.

Сумісність з ПЗ для обробки даних. Апарат має бути сумісним з програмним забезпеченням для виконання 3D реконструкцій таких як DroneDeploy, Pix4D, Skydio 3D Scan, для порівняння результатів інспекцій, ведення журналу змін та формування звітів.

1.2.2 Аналіз сучасних моделей БПЛА та вибір оптимального рішення під поставлену задачу

DJI Matrice 350 RTK – платформа нового покоління для промислових завдань. Підтримує широкий спектр різноманітних датчиків, включаючи гібридні

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



Рисунок 1.6 – зовнішній вигляд Autel Dragonfish [19]

Основні характеристики:

- час польоту: 120–180 хв (залежно від моделі);
- дальність польоту до 30 км;
- модулі RTK;
- гібридні датчики (до 4К масштабування, тепловізор);
- автоматичне планування польоту.

Перевагами цього БПЛА є найкраща автономність у класі, висока стабільність на великих відстанях роботи. Також він підходить для масштабного моніторингу. Недоліками є менша гнучкість при інспекції на близьких відстанях, також великий розмір, складніша логістика.

Skydio X2 – дрон зі штучним інтелектом з надзвичайно розвиненою автономною навігацією та уникненням перешкод. Особливо ефективний у складних умовах або при ручному управлінні з підтримкою ШІ [20]. Зовнішній вигляд моделі зображено на рисунку 1.7.



Рисунок 1.8 – зовнішній вигляд DJI Mavic 3 Enterprise [18]

Основні характеристики:

- час польоту: до 45 хв;
- камера: 4/3 CMOS + камера з масштабуванням;
- RTK (доступний модуль);
- автоматизовані маршрути (обмежено).

Перевагами цього рішення є легкість та мобільність, доступна ціна. Також цього БПЛА достатньо для базових перевірок. Недоліками є низький опір вітру (~10 м/с), обмежена сумісність зі сторонніми датчиками.

Flyablity Elios 3 – дрон для перевірок всередині інфраструктури, оснащений захисним куполом та LiDAR [21]. Зовнішній вигляд зображений на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 – зовнішній вигляд Flyablity Elios 3 [21]

Основні характеристики:

- оснащений сферичним захистом;

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- LiDAR + камера високої роздільної здатності;
- SLAM-навігація для середовищ без GPS;
- підходить для обмежених просторів.

Основою перевагою є унікальність цього БПЛА для перевірок вузьких або закритих об'єктів. Також він безпечний у складних просторах. Критичним недоліком є те що він не підходить для інспекції лопатей та недостатній час польоту (~10 хв). Отже, оглянувши основні БПЛА які представлені на ринку порівняємо їх ключові характеристики та сформуємо порівняльну таблицю.

Таблиця 1.2 – Порівняння ключових характеристик БПЛА

Характеристика	DJI Matrice 350 RTK	Autel Dragonfish	Skydio X2	Mavic 3 Enterprise	Flyability Elios 3
Час польоту	До 55 хв	До 180 хв	До 35 хв	До 45 хв	До 10 хв
Стандарт захисту	IP55	IP43	IP54	IP45	IP44
Точність позиціонування	RTK	RTK	Немає, ШІ навігація	RTK (модуль)	SLAM
Уникання перешкод	6 напрямків	Часткове	360° ШІ	Вгору, вниз, вперед	360°
Підтримка змінних сенсорів	Так	Так	Обмежена	Ні	Ні
Рівень автоматизації	Повний	Повний	Повний	Частковий	Частковий
Гнучкість	Висока	Низька	Середня	Середня	Низька
Складність керування	Висока	Середня	Низька	Низька	Низька

Отже, з огляду на специфіку задачі інспекція лопатей ВЕУ з урахуванням погодних умов, великої висоти, складної геометрії об'єкта та потреби в автоматизації найкращим вибором є DJI Matrice 350 RTK, на цей вибір повпливали професійна надійність та точність завдяки RTK, потужному GPS та сенсорам. Висока стабільність у вітряних умовах та захист по стандарту IP55. Гнучкість для реалізації спіральних, лінійних та орбітальних обльотів. Сумісність із найкращими сенсорами (H20T для комбінованого фільмування, L1 для LiDAR інспекцій тощо).

Повна підтримка автоматичних сценаріїв обльоту (Включно з маршрутом адаптованим до геометрії ВЕУ).

1.3 Висновки до першого розділу

У ході проведених теоретичних досліджень було виявлено, що конструктивні особливості вітроенергетичних установок – зокрема, значні габарити конструкції, наявність рухомих частин (лопатей), а також складні аеродинамічні умови, перешкоди від металічних блискучих поверхонь, які негативно можуть впливати на навігацію БПЛА, суттєво ускладнюють процес планування безпечних та ефективних траєкторій для інспекції ВЕУ засобами БПЛА. Ці умови вимагають не лише врахування геометрії об'єкта, а й врахування умов навколишнього середовища, таких як вітер, турбулентність, погодні умови тощо.

Огляд наявних методів побудови траєкторій зокрема спірального обльоту, лінійної сегментованої інспекції та окремої інспекції лопатей, виявив що кожен з методів має свою специфіку застосування. Спіральна траєкторія забезпечує повне охоплення об'єкта дослідження, а саме вежі та лопатей, але складна у реалізації в умовах обмеженого простору або вітряної погоди. Лінійна сегментована інспекція надає хорошу структурованість даних, однак можуть бути пропуски у важкодоступних зонах. Даний метод також вимагає високої стабільності під час польоту та точного позиціонування. Що до окремого обльоту лопатей, то такий

						КвРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			22

чудово підходить для точної інспекції, проте він не охоплює інші компоненти ВЕУ, та потребує більших затрат часу на виконання місії.

На основі аналізу, я прийшов до висновку, що розглянуті методи мають як свої переваги, так і недоліки, проте жоден з них не охоплює повний спектр задач, пов'язаних з безпечною, точною та ефективною інспекцією ВЕУ у реальних умовах. Кожен з алгоритмів має свою сферу застосування, про те не є універсальним підходом у розв'язанні питання інспекції ВЕУ в змінних умовах середовища, різномайття типів вітротурбін і вимог до якості даних. Це дослідження свідчить про необхідність впровадження адаптивного підходу до планування траєкторій, який дозволить змінювати параметри польоту залежно від конструкції ВЕУ, погодних умов, стану лопатей, вимог до точності інспекції. Прикладом такої технології може слугувати підхід, представлений у роботі Svystun S. та співавторів [1], який демонструє ефективність динамічного коригування траєкторії БПЛА під час інспекції ВЕУ. У рамках цієї роботи пропонується розширити і вдосконалити зазначений підхід шляхом інтеграції додаткових сенсорів для покращення алгоритмів адаптації до змінних погодних умов.

У другому підпункті було проведено аналіз моделей БПЛА, що представлені на ринку, проаналізовано основні критерії вибору для проведення ефективної інспекції, серед яких: тривалість польоту, опір вітру, підтримка високоточних навігаційних систем RTK/GNSS, наявність систем для уникнення перешкод, сумісність з професійним обладнанням для збору візуальної інформації, наявності SDK/API для інтеграції БПЛА в систему обробки даних. На основі цих критеріїв було розглянуто декілька популярних моделей на ринку. Після порівняння характеристик я прийшов до висновку, що найкращим БПЛА для планування та здійснення такого роду завдань є DJI Matrice 350 RTK. Дана модель відповідає усім встановленим критеріям. Наявність високоточної навігації, 6-стороння система уникання перешкодам, великий час польоту, наявність SDK для інтеграції в сторонні системи обробки даних роблять його найкращим для такого виду місії.

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

2 АРХІТЕКТУРА КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ БПЛА ДЛЯ ОБЛЬОТУ ЛОПАТЕЙ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З УРАХУВАННЯМ ПОГОДНИХ УМОВ

2.1 Апаратне забезпечення системи адаптивного планування

До апаратного забезпечення кіберфізичної системи належатимуть: льотна платформа, навігаційна система, система управління та передачі даних, сенсорне обладнання, вбудоване обладнання для моніторингу погодних умов, наземна платформа.

2.1.1 Льотна платформа

Згідно з першим розділом для цієї системи було обрано БПЛА DJI Matrice 350 RTK. Цей вибір зумовлений не лише базовими льотними характеристиками, а й низкою функцій що є критичними для виконання складних інспекційних завдань. Як згадано вище DJI Matrice 350 RTK демонструє комфортний час польоту від одного акумулятора (до 55 хв без корисного навантаження). Це дозволяє виконувати тривалі місії або оглядати великі вітрові турбіни без частого заміни акумуляторів. Важливою характеристикою для роботи поблизу вітрових турбін є підвищений опір вітру до 12 м/с, що забезпечує стабільність польоту та утримання траєкторії навіть при значних вітрових навантаженнях. Широкий діапазон робочих температур (від -20°C до 50°C) дозволяє експлуатувати дрон в різних кліматичних умовах України. Що стосується навігації то ключовою перевагою цього БПЛА є наявність інтегрованої системи RTK яку ми розглянемо окремо. На додаток до RTK та підтримки основних навігаційних систем GNSS (GPS, BeiDou, Galileo) БПЛА оснащено системою виявлення перешкод (Pitch Control) з 6 сторін та інфрачервоними сенсорами що значно підвищує безпеку польоту в складних умовах та поблизу перешкод. Платформа має максимальну злітну вагу 9.2 кг, та

						КвРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			24

може нести корисне навантаження 2.7 кг. Офіційно дана модель підтримує широкий спектр сенсорного обладнання що забезпечує гнучкість у виборі інструментів для збору даних. Також наявна можливість встановлення одного або двох підвісів знизу, а також підвісу зверху що значно розширює варіанти конфігурації системи. Оскільки завдання передбачає польоти у різні погодні умови наявність ступеня захисту IP55 не буде зайвим. Це означає захист від пилу та струменів води під низьким тиском. Хоча і виробник не рекомендує польоти в умовах зливи, цей рівень захисту підвищує надійність роботи в умовах підвищеної вологості або запиленості, що можуть траплятись під час інспекцій. Нова система живлення з підтримкою гарячої заміни батарей підвищує ефективність експлуатації та зменшує витрати.

2.1.2 Навігаційна система

Основною навігації є RTK, або кінематика реального часу – це сучасний метод диференціальної корекції для глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), таких як GPS, Galileo та BeiDou. Ця технологія дозволяє значно підвищити точність позиціонування порівняно зі звичайними GNSS-приймачами. Наприклад, в той час, як типовий GPS-приймач в смартфоні або автомобілі забезпечує точність в межах декількох метрів, RTK може досягти точності до декількох сантиметрів. Для дрона DJI Matrice 350 RTK заявлена точність становить 1 см + 1 мч. по горизонталі та 1,5 см + 1 мч. по вертикалі за умови стабільного з'єднання з RTK (RTK FIX). Суть роботи RTK полягає використанні базової станції, яка розташована у відомій, фіксованій точці, та передає коригуючі сигнали до рухомого передавача. Ці сигнали враховують вплив атмосферних значень, затримок сигналу, а також інші похибки супутникової навігації, що дозволяє повністю нівелювати їх. Позиціонування в технології RTK зображено на рисунку 2.1.

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

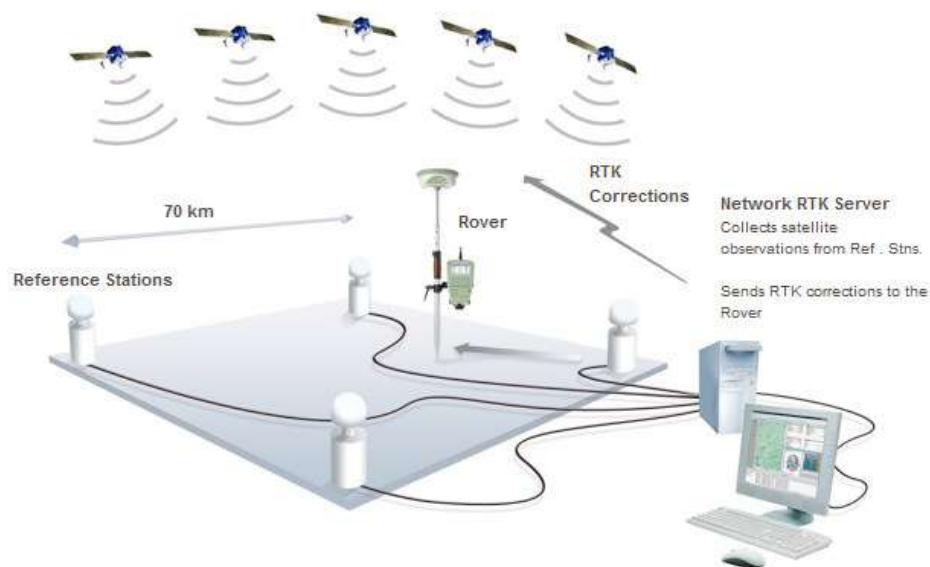


Рисунок 2.1 – Принцип роботи системи RTK

Як ми бачимо з рисунка 2.1 RTK базується на чотирьох компонентах: базова станція, рухомий приймач, канал передачі даних, корекція рухомого приймача.

Базова станція – це стаціонарний GNSS-приймач який встановлений у точці з задалегідь відомими координатами. Це може бути як мобільна станція типу DJI D-RTK 2, яка встановлена на штативі над відомою точкою, або активна станція мережі. Оскільки в багатьох країнах, в тому числі Україні створено мережу базових станцій RTK використовуватимемо ми саме її. На рисунку 2.1 Зображено покриття RTK в Україні.

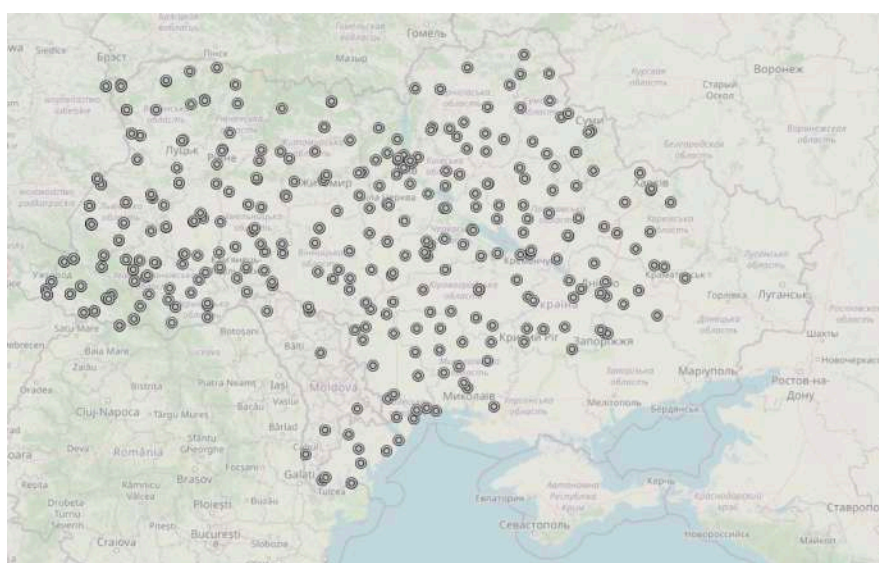


Рисунок 2.2 – Мапа покриття RTK в Україні

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Рухомий приймач або як заведено називати Ровер – в нашому випадку це БПЛА Matrice 350 RTK, має на борту RTK приймач, він приймає сигнали від аналогічних супутників GNSS що й базова станція.

Канал передачі даних – базова станція передає обчислені диференційні поправки на ровер у режимі реального часу. Дана передача буде здійснюватись через інтернет за допомогою протоколу NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol).

Корекція рухомого передавача – БПЛА, отримавши поправки у від базової станції RTK застосовує їх до власних вимірювань GNSS-сигналів. Це дозволяє усунути більшість спільних для обох приймачів помилки.

Використання RTK є ключовим елементом для точної та безпечної роботи системи, оскільки забезпечує сантиметрову точність навігації, що дозволяє дрону точно слідувати складним траєкторіям при обльоті лопатей вітроенергетичних установок та споруд. Це не тільки мінімізує ризик зіткнень, але й гарантує стабільну відстань для якісної фото та відео фіксації. Крім того, RTK забезпечує точну географічну прив'язку кожного зображення або вимірювання, що має вирішальне значення для виявлення дефектів, ведення історії перевірок та інтеграції з ГІС і 3D-моделями. Технологія також дозволяє дрону зберігати свою позицію з високою стабільністю навіть у вітряну погоду, зменшуючи розмитість зображення, а її алгоритми краще працюють у складних умовах поблизу великих металевих конструкцій. Все це робить RTK незамінною основою для реалізації адаптивного керування польотом і точної компенсації зовнішніх факторів.

2.1.3 Система управління та передачі даних

Система зв'язку між дроном DJI Matrice 350 RTK і наземною станцією керування (DJI RC Plus) базується на фірмовій технології DJI O3 Enterprise Transmission – передовій платформі бездротової передачі даних, спеціально розробленій для потреб промислових дронів.

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

включає канали телеметрії, що містять актуальну інформацію про положення дрона, стан RTK, швидкість, орієнтацію, стан системи живлення, параметри вітру та системні оповіщення.

Для додаткової надійності DJI Matrice 350 RTK підтримує підключення зовнішнього 4G модему, що дозволяє використовувати функцію Enhanced Transmission. В цьому режимі дрон може автоматично перемикатися між основною системою зв'язку O3 Enterprise і мобільною мережею 4G, яка забезпечує резервний канал на випадок втрати сигналу основної лінії. Крім того, 4G-з'єднання можна використовувати для отримання RTK-поправок через NTRIP без необхідності підключення до інтернету на пульті дистанційного керування. Все це робить систему передачі DJI O3 Enterprise потужним, гнучким і відмовостійким рішенням, яке повністю відповідає вимогам до стабільного зв'язку під час високоточних перевірок вітрових турбін.

2.1.4 Сенсорне обладнання

Розберемо детально сенсорне обладнання, яке буде встановлено на льотну платформу. Основна сенсорна система це DJI Zenmuse H20T, його вигляд зображено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Сенсорна система DJI Zenmuse H20T

						КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			29

Це багатофункціональне гібридне корисне навантаження, яке поєднує кілька критично важливих датчиків в одному стабілізованому тривісному карданному підвісі, що робить його особливо ефективним для завдань інспекції лопатей вітроенергетичних установок. Приблизна вага пристрою становить 828 грамів.

DJI Zenmuse H20T – це високотехнологічна гібридна камера, спеціально розроблена для складних завдань, таких як перевірка лопатей вітрових турбін. Вона поєднує в собі кілька датчиків, кожен з яких виконує критично важливу функцію. Камера з 1/1,7-дюймовим CMOS-сенсором з роздільною здатністю 20 мегапікселів і потужним гібридним зумом (до 200-кратного збільшення) дозволяє детально оглядати поверхню лопаті з безпечної відстані. Завдяки високій роздільній здатності він ефективно виявляє мікротріщини, ерозійні пошкодження, сліди від ударів або відшарування покриття. Ці зображення також можуть бути використані для алгоритмічної ідентифікації структури лопаті при плануванні маршруту огляду. Система доповнена ширококутною камерою, яка дозволяє здійснювати просторову орієнтацію і загальний огляд об'єкта, що особливо корисно при маневруванні навколо споруди.

Тепловізійна частина системи - радіометрична камера з матрицею 640×512 пікселів - відкриває можливість виявлення прихованих дефектів, недоступних для звичайного візуального огляду. Завдяки здатності точно вимірювати температуру кожного пікселя, ця камера дозволяє аналізувати наявність вологи, розшарування композиту, проблеми зі склеюванням або функціонуванням систем запобігання обледеніння. Лазерний далекомір, що входить до складу модуля, забезпечує точне визначення відстані до об'єкта (до 1200 м), що допомагає автоматизованій системі управління підтримувати оптимальну дистанцію під час польоту.

Вся конструкція камери стабілізована на трьохосовому карданному підвісі, що гарантує чітке зображення навіть у вітряну погоду або під час активного руху дрона. Камера має клас захисту IP44 для використання в суворих польових умовах. Інтелектуальні функції, включаючи можливість одночасного збору даних з

										КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							30

декількох датчиків, значно оптимізують процес збору даних, що робить DJI Zenmuse H20T незамінним інструментом для точного і всебічного огляду лопатей.

2.1.5 Вбудоване обладнання для моніторингу погодних умов

DJI Matrice 350 RTK не має вбудованих погодних датчиків, таких як анемометр, термометр або гігрометр, які забезпечують пряме вимірювання параметрів навколишнього середовища. Однак під час польоту система керування безперервно оцінює стан вітру в режимі реального часу. Цей процес базується на непрямих даних з різних бортових датчиків і передбачає складну обробку інформації.

Коли дрон зависає або рухається за заданою траєкторією, навіть незначне відхилення від бажаного положення через вплив вітру викликає коригувальні дії. Система використовує дані високоточної GNSS/RTK, яка передає інформацію про швидкість і координати, а також показники інерціальної навігаційної системи (IMU), яка відображає нахили і зміни положення. Аналізуючи, як дрон змінює потужність двигуна або орієнтацію для компенсації зносу, система може опосередковано оцінити характеристики вітру, такі як швидкість і напрямок вітру.

Ці оцінки, хоча і не є прямими вимірюваннями, є достатньо точними для забезпечення стабільності польоту і можуть бути прочитані через SDK або переглянуті в журналах. Зокрема, вони можуть бути інтегровані у власні системи управління польотом для динамічного коригування траєкторій в умовах змінного вітру. Водночас слід враховувати, що точність таких розрахунків залежить від характеру польоту: вони менш надійні під час активних маневрів або при сильних поривах. Підвищити ефективність роботи вбудованої системи в різноманітних погодних умовах можуть зовнішні датчики які можуть бути встановлені, це питання буде глибоко розкрито в пункті 2.3.

									КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
										31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

2.1.6 Наземна платформа управління.

Не останню роль в кіберфізичній системі відіграватиме наземна платформа управління, оскільки всі обчислення будуть відбуватись на землі та передаватись через SDK DJI на льотну платформу. Оскільки в роботі будуть використані інструменти ШІ (Detectron2, OpenCV) необхідні достатні обчислювальні потужності для швидкої роботи ШІ. Також навчання ШІ це складний та кропіткий процес який вимагає великої кількості обчислювальних ядер. Було прийнято рішення використовувати відеокарту через її велику кількість ядер, які здатні виконувати операції паралельно. У запропонованому рішенні використовується GPU Nvidia RTX 4060 Ti. На борту вона має 4608 CUDA ядер. Якщо порівняти кількість ядер CPU та GPU одразу буде видно перевагу GPU для навчання ШІ. Базовий процесор матиме 4 – 12 ядер, тоді як згадана раніше відеокарта на базі кристала 4060 Ti – 4608. Це колосальна різниця яка суттєво вплине на час навчання ШІ моделей. До прикладу, навчання завдяки обчислювальним потужностям процесора складатиме близько двох тижнів, у той ж час за допомогою відеокарти з сучасним графічним процесором цей час буде зменшено до 4 – 6 годин. Також важливим фактором буде оптимізація більшості бібліотек ШІ зокрема, TensorFlow, PyTorch, Keras під ядра CUDA. Оскільки система ДуТАМ працює на базі Microsoft .Net версії 8 запропоновано використати систему Windows з наступними характеристиками:

- 1) процесор Intel Core I5-10400 6 ядер/12 потоків 2.9 – 4.3 ГГц;
- 2) відеокарта Gigabyte RTX 4060 Ti 8 Гб, 4608 ядер 2535 МГц;
- 3) материнська плата Gigabyte H410M H V3;
- 4) оперативна пам'ять DDR4 16 Гб 2400 МГц;
- 5) пристрій накопичення SSD Kingston NV1 PCI-E3 500 Гб;
- 6) блок живлення 500 Вт;
- 7) операційна система Windows 10 Pro.

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

2.2.1 Програмна бібліотека Detectron2

Detectron2 – це сучасна бібліотека програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, створена дослідницьким підрозділом компанії Meta (раніше відома як Facebook AI Research - FAIR). Вона слугує платформою нового покоління для вирішення завдань комп'ютерного зору, таких як виявлення об'єктів та сегментація зображень. Бібліотека базується на фреймворку глибокого навчання PyTorch, що забезпечує її високу гнучкість та продуктивність. В її основі лежить концепція двоступеневого виявлення об'єктів, яка реалізується завдяки архітектурі MASK R-CNN – одній з найпотужніших моделей у сфері комп'ютерного зору.

Першим етапом мережа визначає потенційні області на зображенні, в яких можуть бути об'єкти, за допомогою регіонального пропозиційного механізму.

Другим етапом для кожної з запропонованих областей проводиться класифікація (визначення, що це за об'єкт) та уточнення меж.

У разі сегментації об'єктів, додатково генерується піксельна маска кожного об'єкта, що дозволяє точно окреслити його контури. Основними компонентами Defectron2 є:

- Backbone (основа) – CNN модель, яка вилучає ознаки з вхідного зображення.
- Feature Pyramid Network (FPN) – дозволяє працювати з об'єктами різноманітних масштабів завдяки багаторівневому представлених ознак.
- Region Proposal Network (RPN) – генерує регіони інтересу, там де можуть бути об'єкти.
- RoIAlign – метод просторового вирівнювання ознак, який зберігає точність розміщення пікселів необхідних для сегментації.
- Керівники задач (task heads) – окремі мережі для класифікації, регресії координат та побудови масок.

Приклад роботи системи зображено на рисунку 2.6.

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

2.2.2 Бібліотека програмних інструментів OpenCV

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) – бібліотека з відкритим вихідним кодом, призначена для реалізації задач комп'ютерного зору, обробки зображень та машинного навчання. Вона написана переважно на C++ з прив'язкою до Python, Java та інших мов. OpenCV надає ефективні алгоритми реального часу, що робить її особливо популярною в робототехніці, БПЛА та системах технічного зору. Основними концепціями в обробці зображень є: представлення зображень, фільтрація та згладжування, бінаризація та граничних меж об'єкта.

В бібліотеці присутні також алгоритми для контурного аналізу та геометрії що потрібні будуть потрібні надалі, ними є: `findContours`, `minAreaRect`, `moments`.

Варто їх розглянути детальніше, оскільки використання цих функцій передбачено у системі адаптивного планування траєкторії.

`FindContours` – це один з ключових алгоритмів OpenCV, який дозволяє знаходити замкнуті контури об'єктів на бінаризованому зображенні. Він повертає координати всіх точок контуру, що корисно для подальшого аналізу форми.

`MinAreaRect` – малює прямокутник мінімальної площі, який охоплює контур. Цей прямокутник не обов'язково має бути орієнтований горизонтально або вертикально - його можна обертати. Це дозволяє розрахувати кут нахилу об'єкта, який є критичним для орієнтації лопатей вітроенергетичних установок.

`Moments` – цей алгоритм використовуються для обчислення геометричних характеристик контурів, таких як центр мас, площа та орієнтація.

В системі OpenCV відіграватиме ключову роль не етапах обробки зображень та геометричного аналізу. Цей процес слідуватиме за сегментацією, виконаний за допомогою `Defectron2`. Якщо вище згадана програмна бібліотека відповідає за високорівневу ідентифікацію сцени, то OpenCV буде використаний для точного аналізу геометрії виділених об'єктів. Конкретні завдання OpenCV є:

Обробка масок сегментації. Після генерації масок пікселів для лопатей, вежі та гондоли за допомогою `Defectron2`, бібліотека OpenCV використовується для

2.2.3 Програмне забезпечення екосистем DJI та ПД-регулятора

Для реалізації цієї кіберфізичної системи ми будемо взаємодіяти з кількома рівнями програмного забезпечення компанії DJI

Прошивка БПЛА та компонентів – це низькорівневе ПЗ вбудоване безпосередньо в льотну платформу, його польотний контролер, сенсори (RTK модуль навігації, IMU), пульт керування БПЛА (DJI RC Plus) та корисне навантаження (Zenmuse H20T). Його роль - це функціонування апаратних компонентів, обробку сигналів з сенсорів, виконання команд у польоті (стабілізація, навігація за GPS/RTK, утримання висоти), безпеку та передачу даних через OS Enterprise та управління живленням моторів, та іншого обладнання. Це «Операційна система» дрона.

Також до інфраструктури належить додаток DJI Pilot 2 – це основний додаток, який працює на пульті DJI RC Plus, та слугує головним інтерфейсом для оператора при взаємодії з льотною платформою. В межах цієї роботи програмне забезпечення забезпечує як повне ручне керування дроном і корисним навантаженням (наприклад, камерою H20T), так і моніторинг усіх параметрів польоту в режимі реального часу - від відеопотоку і позиціонування до стану батареї та RTK. Оператор може не тільки стежити за телеметрією, а й керувати польотом вручну. Крім того, система надає розширені інструменти для планування стандартних місій, таких як політ до заданих точок, створення картографічних зображень, похила аерофотознімання або політ уздовж лінійних об'єктів. Функція запису місії в режимі реального часу дозволяє автоматизувати повторне виконання маршруту, прокладеного вручну. Також передбачена гнучка взаємодія з корисним навантаженням: користувач може керувати камерами, налаштовувати параметри фото та відеофіксації, змінювати тип сенсора або активувати зум. Функція AI Spot-Check дозволяє проводити інтелектуальну повторну перевірку, автоматично визначаючи та кадруючи потрібні об'єкти. Крім того, програмний інтерфейс

						КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			38

дозволяє оновлювати прошивку, налаштовувати дрон і керувати системою живлення.

Наступним компонентом інфраструктури програмного забезпечення DJI є DJI Payload SDK (PSDK). Це ключовий інструмент для розробки сторонніх рішень та імплементації в програмне забезпечення дрона, яке буде реалізовувати унікальну логіку цієї кіберфізичної системи. PSDK дозволяє програмному коду, що виконується на бортовому комп'ютері взаємодіяти з програмним забезпеченням дрона, отримувати доступ до функцій та даних дрона. Запропонована система забезпечує безперервний доступ до поточних телеметричних даних безпілота, включаючи координати від високоточної RTK-навігації, орієнтацію, висоту та швидкість. Одночасно отримуються зображення з бортової камери H20T, а також потенційно доступна інформація про вітрові умови, які оцінюються самим дроном. Адаптивне планування траєкторії може бути реалізоване через програмне керування польотом, коли зовнішній алгоритм розраховує оптимальні параметри і передає їх у вигляді команд на переміщення в певні точки, з певною швидкістю або на заданій висоті. Також передбачена інтеграція з камерами через API: система здатна автоматично ініціювати фото або відео фіксацію, збільшувати масштаб і контролювати інші параметри. Дана система є основою для модифікування дрона, імплементація сторонніх датчиків реалізується саме через цими інструментами. Крім того, система має можливість двосторонньої взаємодії з наземною станцією управління: вона може передавати результати аналізу (наприклад, сегментовані зображення або згенеровану траєкторію) і отримувати відповіді або нові параметри для адаптації місії.

Окремим елементом в системі управління та ПЗ є PID (пропорційно-інтегрально-диференціальний) регулятор. Він є ключовим елементом в системі стабілізації БПЛА у польоті. Він забезпечує точне та стійке керування положенням у просторі. PID регулятор підтримує задані параметри польоту такі як: висота, курс нахил або швидкість, шляхом постійного коригування команд на мотори залежно

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

від поточних відхилень. Принцип роботи PID регулятора, як впливає з його назви, базується на трьох складових:

– Пропорційна складова (P) реагує на поточну помилку – різницю між бажаним і фактичним значенням (наприклад, кутом нахилу БПЛА). Чим більше відхилення, тим сильніша реакція.

– Інтегральна складова (I) враховує накопичену помилку з часом. Це дозволяє компенсувати систематичні зсуви, наприклад, через нерівномірну масу або постійний вітер.

– Диференціальна складова (D) прогнозує зміну похибки - реагує на швидкість зміни відхилення. Вона допомагає «демпфірувати» коливання і зробити систему більш плавною.

2.3 Архітектура модуля метеоаналізу для адаптації траєкторії

Як описано в архітектурі апаратного забезпечення льотної платформи DJI Matrice 350 RTK не має вбудованого анемометра та оцінює напрямок покладаючись на бажаний стан, аналіз відхилень та зусиль.

Контролер польоту безпілотної літака постійно порівнює бажаний стан польоту - наприклад, утримання фіксованої позиції GPS/RTK або рух по заданій траєкторії з певною швидкістю - з фактичними даними, отриманими від навігаційних датчиків. Дані про положення і швидкість відносно земної поверхні надходять від GPS або RTK, тоді як орієнтація і прискорення вимірюються інерціальною навігаційною системою (IMU). У разі відхилення, наприклад, через вітер, контролер аналізує цю похибку і відповідно коригує параметри польоту: визначає необхідні кути нахилу апарату (крен і тангаж), щоб дрон нахилився в бік, протилежний дрейфу, створюючи горизонтальну складову тяги. Одночасно регулюється потужність двигунів для стабілізації висоти та компенсації зовнішніх сил.

									КвРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						40

Запропонований мною підхід передбачає використання зовнішнього датчика анемометра для забезпечення точних даних про вітер. Розберемо кожен компонент системи метеоконтролю окремо.

Розпочнемо з датчика анемометра, FT205 – це надточний ультразвуковий анемометр, розроблений компанією FT Technologies. Його основне призначення це забезпечення надійного, безперервного збору даних про швидкість та напрямок вітру навіть у складних погодних умовах. Датчик, завдяки своїй малій вазі, високій стійкості до вібрацій і електромагнітних завад ідеально підходить для використання на БПЛА, мобільних метеостанціях, вітроенергетичних установках, а також у сферах безпеки та моніторингу. Зовнішній вигляд датчика зображений на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Анемометр FT205

Основні характеристики:

- вага: 100 г;
- діапазон вимірювання швидкості вітру: 0-75 м/с;
- діапазон робочих температур: від -20°C до +70°C;
- максимальна робоча висота: до 4000 м;
- матеріал корпусу: композит графіту та нейлону;

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

- інтерфейси передачі даних: RS485, RS422 або UART;
- захист: повністю герметичний і водонепроникний.

Також на БПЛА відсутній датчик вологості, тому його буде встановлено окремо. Показання цього датчика будуть корисні для аналізу на землі та вдосконалення адаптивної технології. Було вирішено використовувати модуль на основі датчика Bosh BME 280. Він достатньо легкий, підходить по діапазону, потребує мало енергії для живлення. Зовнішній вигляд модуля зображено на рисунку 2.8.

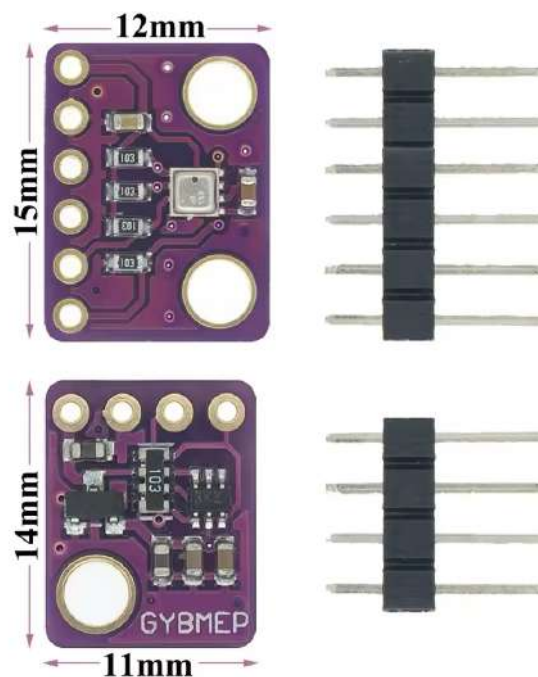


Рисунок 2.8 – Датчик вимірювання вологи.

Усі датчики будуть підключені до мінікомп'ютера Raspberry PI 3B. Це серія одноплатних комп'ютерів розроблених у Великій Британії благодійною організацією. Він ідеально підходить під задачу, оскільки має мале енергоспоживання, компактний розмір та підходить для такого типу обчислень. Також він працює під керуванням ОС Linux що спрощує задачу для написання програмного забезпечення. Комп'ютер також буде оснащений MicroSD картою для

зберігання польотних записів, для аналізу їх на землі та вдосконалення адаптивної траєкторії. Зовнішній вигляд зображено на рисунку 2.9.



Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд Raspberry PI 3 Model B

Останній компонент буде поєднувати нашу систему з дроном. Це DJI E Port Development Kit. Він дозволяє з'єднати БПЛА з Raspberry PI за допомогою UART та забезпечити живленням Raspberry PI та датчики. Цей модуль є найголовнішим у системі оскільки без нього неможливо утворити зв'язок між системою метеоаналізу та БПЛА, який у свій час з'єднаний з наземною станцією керування Також даний модуль дозволяє отримати внутрішні дані з дрона для логування, та передати дані про вітер на землю для корекції траєкторії. Його зовнішній вигляд зображений на рисунку 2.10.

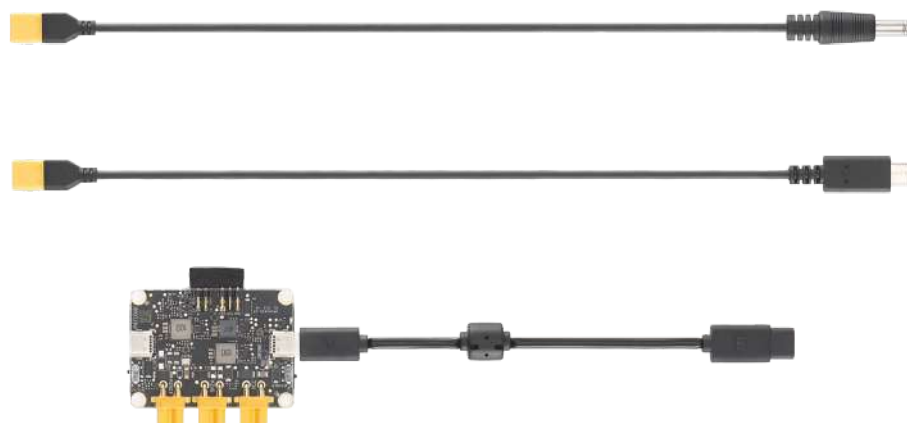


Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд DJI E Port Development Kit

Він також має три варіанти живлення для підключення корисного навантаження. Оскільки датчик FT205 потребує спеціального живлення 6-30 В дана перевага буде дуже корисною при збірці.

Програмним забезпеченням для системи метеоаналізу виступатиме власна програма написана на мові C#. Оскільки PSDK буде приєднано до порту SkyPort на дроні, то PSDK зможе отримувати дані з дрона, а саме висоту, координати, рівень заряду акумулятора, також через SkyPort в дрон буде передаватись вектор швидкості. Сам вектор швидкості буде вираховано власним програмним забезпеченням на базі показань датчика FT205. Таким чином розроблена програма буде виконувати наступні дії:

- 1) приймати команди початку на запуск та вимкнення системи метеостеження з PSDK;
- 2) збирати дані про швидкість та напрям вітру з анемометра;
- 3) розраховувати вектор вітру;
- 4) збирати дані про атмосферний тиск, вологу та температуру з BME 280;
- 5) передавати вектор швидкості у PSDK;
- 6) приймати дані з координатами та рівнем заряду акумулятора з PSDK;
- 7) записувати історичні дані у польоті.

Таким чином, за допомогою цих пристроїв та програмного забезпечення ми зможемо передавати точні та актуальні дані про вітер на землю для корекції вбудованого PID регулятора та записувати показання датчиків в польоті за допомогою Raspberry PI для оцінки та вдосконалення адаптивної траєкторії.

2.4 Висновки до другого розділу

У даному розділі було детально розглянуто та спроектовано архітектуру кіберфізичної системи, призначеної для реалізації адаптивного планування траєкторії БПЛА під час інспекції лопатей вітроенергетичних установок з урахуванням погодних умов. Розроблена архітектура інтегрує апаратні та програмні компоненти для забезпечення автономного та ефективного функціонування системи.

Спершу було визначено ключові компоненти апаратного забезпечення. Було глибоко розглянуто можливості обраної льотної платформи. Даний БПЛА зарекомендував себе як такий, що вирізняється надійністю, тривалим часом польоту та високоточною навігаційною системою на базі RTK, яка є критично важливою для позиціонування біля ВЕУ. Система управління та передачі даних базується на технологіях DJI, що забезпечує стабільний зв'язок. Основне сенсорне обладнання містить гібридну камеру Zenmuse H20T яка поєднує візуальні сенсори високої здатності (для детальної інспекції та правильної сегментації надалі) і тепловізор, який дозволить виявити приховані дефекти. Також було розглянуто підхід до моніторингу погодних умов, який спирається на вбудовані засоби оцінки вітру дроном, та обґрунтовано можливість покращення цього підходу, завдяки інтеграції зовнішніх датчиків.

Програмне забезпечення є ядром інтелектуальних можливостей системи. Було визначено роль ключових бібліотек технологій комп'ютерного зору. Система використовуватиме Detectron2 для точної сегментації компонентів ВЕУ, а OpenCV своєю чергою – обробки масок, знаходження контурів та вилучення геометричних

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Реалізація модуля метеоаналізу та інтеграція сенсорів моніторингу погодних умов

Для збірки системи метеоаналізу розпочнемо з заживлення усіх компонентів системи. У дрона є власний акумулятор, а Payload SDK Adapter Board водночас має кілька виходів з гніздами XT60 з різними напругами. Стандартний блок живлення Raspberry PI 3B+ має характеристики 5 В / 3 А, що в сумі дає 15 Вт пікової потужності, проте Adapter Board має на борту 3 конектори XT60 з наступними характеристиками:

- 1) 9 В 2 А, потужність 18 Вт;
- 2) 5 В 2 А, потужність 10 Вт;
- 3) 13.6 В / 17 В 2 А потужність до 34 Вт.

Отже, з наведених характеристик видно що по напрузі нам підходить лише порт який знаходиться посередині, проте його максимальний струм 2 А що не є достатнім для живлення Raspberry PI. Можна використати порт з напругою 9 В, проте необхідно використання DC-DC перетворювача який знизить напругу з 9 вольтів до 5 вольтів, наприклад на базі імпульсного перетворювача MP1482DS.

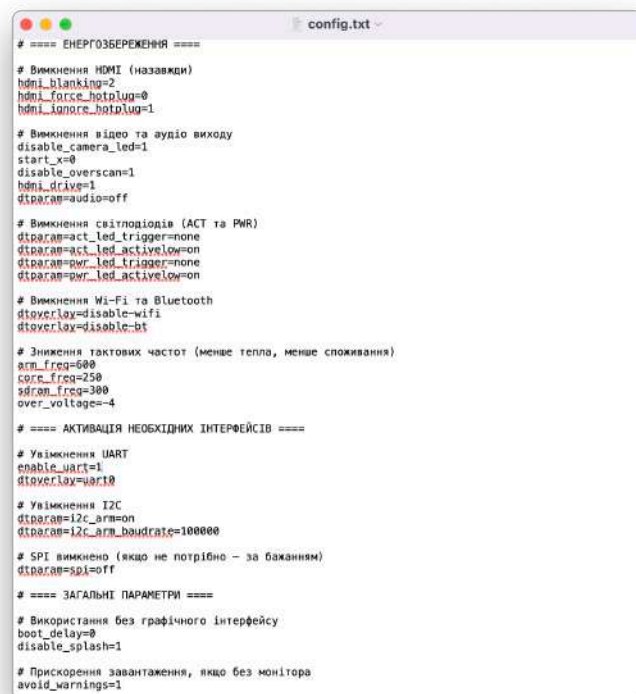


Рисунок 3.1 – DC-DC перетворювач на базі MP1482DS

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Згідно зі специфікацією MP1482DS [50] його ККД до 93%, що означатиме втрати енергії. Це не допустимо тому, що втрати зменшуватимуть польотний час БПЛА. Виходом з даної ситуації може бути вимкнення непотрібних модулів на Raspberry PI та зниження тактової частоти процесора для зниження енергоспоживання.

Для зниження енергоспоживання Raspberry PI потрібно вимкнути Wifi, Bluetooth, HDMI, відеовиходів, камери, звуку, непотрібних USB портів, LED індикації, та знизити тактову частоту процесора. Усі ці маніпуляції проводяться у файлу config.txt (рисунок 3.2) – спеціальному конфігураційному файлі, який зчитується на етапі завантаження прошивки, ще до запуску ОС. Він дозволяє задати апаратні параметри, які не можливо змінити після запуску операційної системи. Дані налаштування дуже важливі в контексті цієї роботи. Через цей файл також відбувається увімкнення UART, I2C / SPI для комунікації з відповідними модулями. В контексті роботи ми використаємо I2C та UART. I2C потрібен для комунікації з BME280, а UART для комунікації з FT205 та PSDK Adapter board.



```
# === ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ===  
  
# Вимкнення HDMI (назавжди)  
hdmi_blanking=2  
hdmi_force_hotplug=0  
hdmi_ignore_hotplug=1  
  
# Вимкнення відео та аудіо виходу  
disable_camera_led=1  
start_x=0  
disable_overscan=1  
hdmi_drive=1  
dtoverlay=audio=off  
  
# Вимкнення світлодіодів (ACT та PWR)  
dtoverlay=act_led_trigger=none  
dtoverlay=act_led_activelow=on  
dtoverlay=pwr_led_trigger=none  
dtoverlay=pwr_led_activelow=on  
  
# Вимкнення Wi-Fi та Bluetooth  
dtoverlay=disable-wifi  
dtoverlay=disable-bt  
  
# Зниження тактових частот (менше тепло, менше споживання)  
arm_freq=600  
core_freq=250  
sdram_freq=300  
over_voltage=-4  
  
# === АКТИВАЦІЯ НЕОБХІДНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ ===  
  
# Увімкнення UART  
enable_uart=1  
dtoverlay=uart0  
  
# Увімкнення I2C  
dtoverlay=i2c_arm=on  
dtoverlay=i2c_arm_baudrate=100000  
  
# SPI вимкнено (якщо не потрібно – за бажанням)  
dtoverlay=spi=off  
  
# === ЗАГАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ===  
  
# Використання без графічного інтерфейсу  
boot_delay=0  
disable_splash=1  
  
# Прискорення завантаження, якщо без монітора  
avoid_warnings=1
```

Рисунок 3.2 – Налаштування config.txt

Також необхідно забезпечити живленням датчик анемометр, згідно з специфікацією він потребує напруги від 6 до 30 вольтів постійного струму, максимально споживаний струм 30 мА. Його можна приєднати до роз'єму XT60 з параметрами 9 В, 2 А. Що стосується датчика ВМЕ280 він не потребує додаткового живлення. PSDK своєю чергою отримуватиме живлення через SkyPort. Схема живлення зображена на рисунку 3.3.

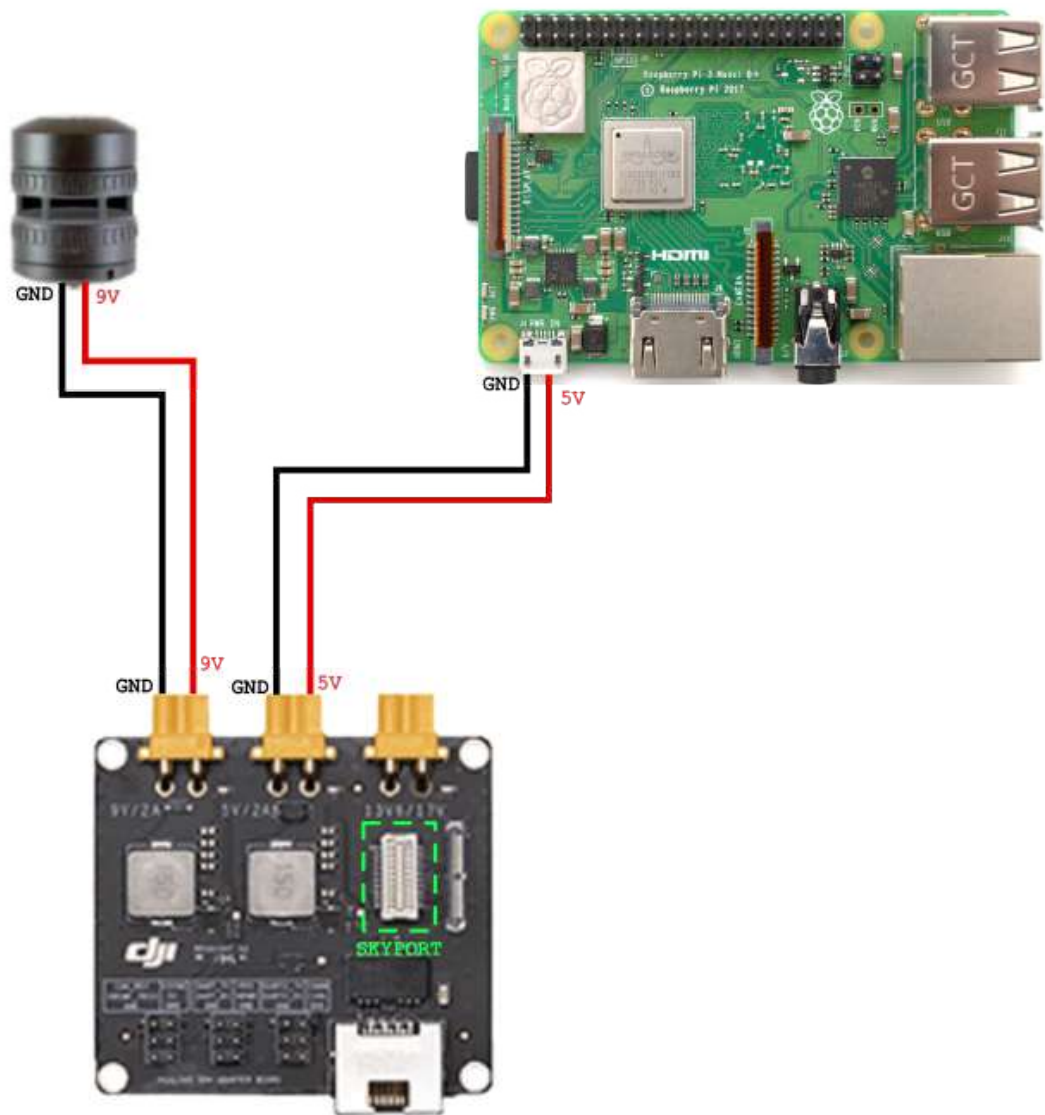


Рисунок 3.3 – Схема живлення компонентів метеоаналізу.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Що стосується передачі інформації, то як зазначено вище FT205 підключатиметься по протоколу UART, водночас BME280 підключатиметься по протоколу I2C. Підключення PSDK Adapter Board відбуватиметься також по протоколу UART. На цьому етапі виникає проблема, оскільки роз'єм GPIO на Raspberry PI 3B+ як видно з рисунка 3.4 має лише одну пару для підключення UART модулів. Це піни GPIO14 (8) та GPIO15 (10).

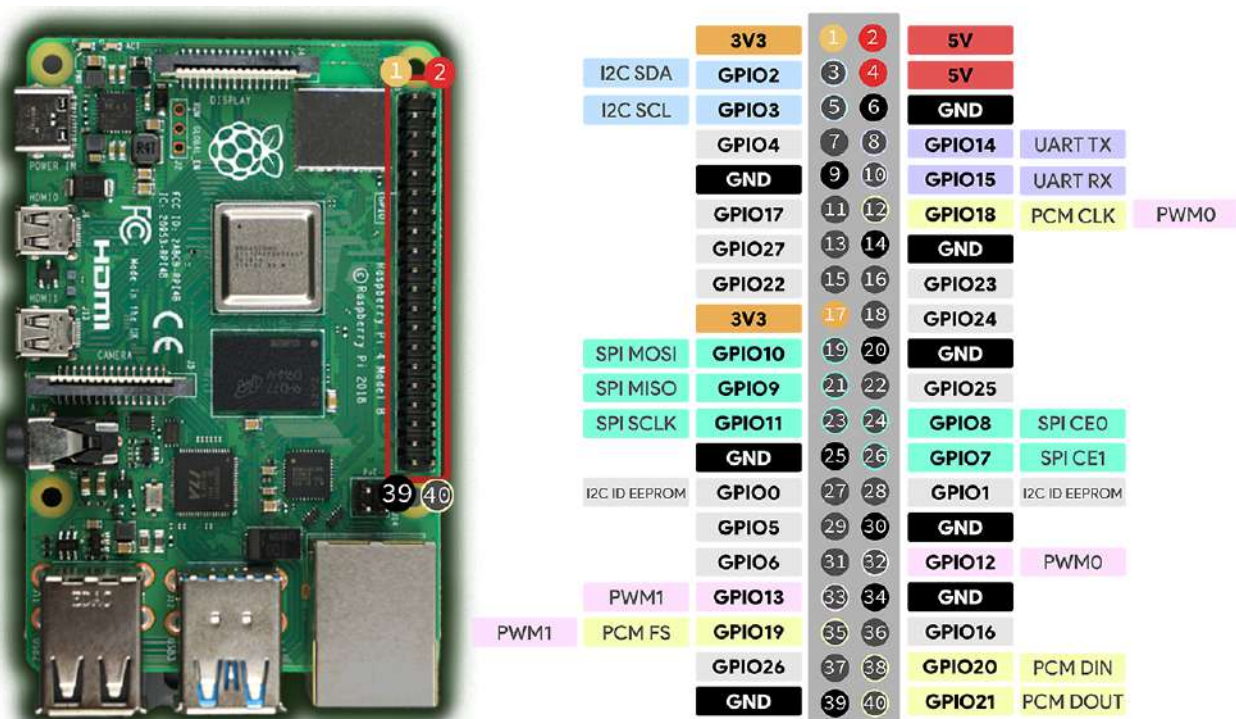


Рисунок 3.4 – Схема роз'єму GPIO на Raspberry PI

Виходом може стати USB to UART адаптер. Оскільки Raspberry PI має 4 роз'єми USB, можна використати UART USB адаптер для підключення FT205 по протоколу UART.

USB-UART перетворювач – це пристрій, який слугує мостом між інтерфейсом USB та інтерфейсом UART. Він дозволяє пристрою з USB портом обмінюватись даними з пристроєм, який має лише UART інтерфейс. Основою використаного адаптера буде мікросхема міст CH340.

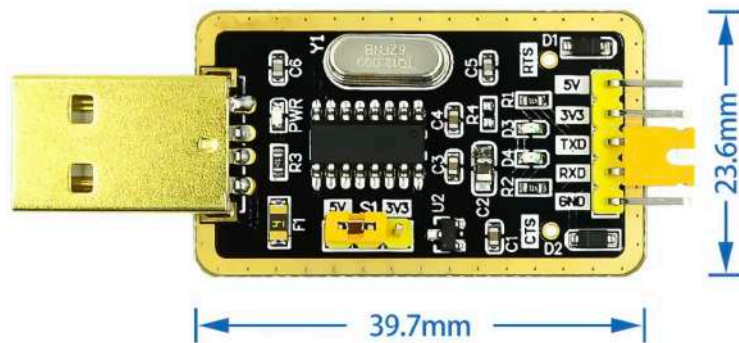


Рисунок 3.5 – USB-UART перетворювач на базі CH340G

Анемометр FT205 використовує 8 контактний роз'єм Molex CLIK Mate. Він підтримує UART, RS422 та RS485. Схема розташування виводів описана в таблиці (табл 3.1).

Таблиця 3.1 – Таблиця виводів анемометра FT205

Пін	Назва сигналу	Опис
1	V+	Живлення (6-30 В) постійного струму
2	GND	Земля
3	TXD (UART)	Передача даних по UART протоколу
4	RXD (UART)	Приймання даних по UART протоколу
5	RS485+	RS485 A (Не використовується)
6	RS485-	RS485 B (Не використовується)
7	RS422 TX+	RS422 TX+ (Не використовується)
8	RS422 TX-	RS 422 TX – (Не використовується)

Таким чином, згідно з таблицею виводи 1,2 будуть підключені у XT60 роз'єм PSDK Adapter Board, 3,4 будуть підключені в USB-UART адаптер, сам адаптер буде підключений у перший USB роз'єм Raspberry PI.

Підключення датчика вологи BME280, як описано вище буде реалізовано по протоколу I2C. Схема виводів модуля BME280 описана в таблиці (табл 3.2).

Таблиця 3.2 – Схема виводів датчика вологи BME280

Пін	Назва	Призначення
1	VIN	Живлення 3.3 В або 5 В
2	GND	Земля
3	SCL	Тактовий сигнал
4	SDA	Дані I2C

У Raspberry PI GPIO роз'єм має усі необхідні контакти для підключення датчика вологи, живлення забезпечується 3.3 В виводами 1, 17. Земля забезпечується виводами 6, 9, 14, 20, 25, 30, 34, 39. Тактовий сигнал SCL забезпечується виводом 5 (GPIO3), дані по I2C виводом 3 (GPIO2). Таблиця підключення BME280 до Raspberry PI описана в таблиці (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Підключення BME 280 до Raspberry PI 3B+

BME 280	Raspberry PI3B+
VIN	3.3V (пін 1)
GND	GND (пін 6)
SCL	GPIO3 (пін 5)
SDA	GPIO1 (пін 3)

Стосовно підключення PSDK Adapter Board, як вже було згадано вище, підключення відбуватиметься по протоколу UART. У конекторі GPIO за UART відповідають виводи GPIO14 – TX (8) передача даних по UART, GPIO15 – RX (10). На PSDK Adapter Board є можливість приєднати до двох пристроїв UART. Контакти позначені як UART_RX/TX та UART2_RX/TX.

Таблиця 3.4 – Підключення Raspberry PI до PSDK Adapter Board по протоколу UART

Raspberry PI 3B+	PSDK Adapter Board
GPIO14 – RX	UART_TX
GPIO15 - TX	UART_RX

Загальна схема підключення зображена на рисунку 3.6.

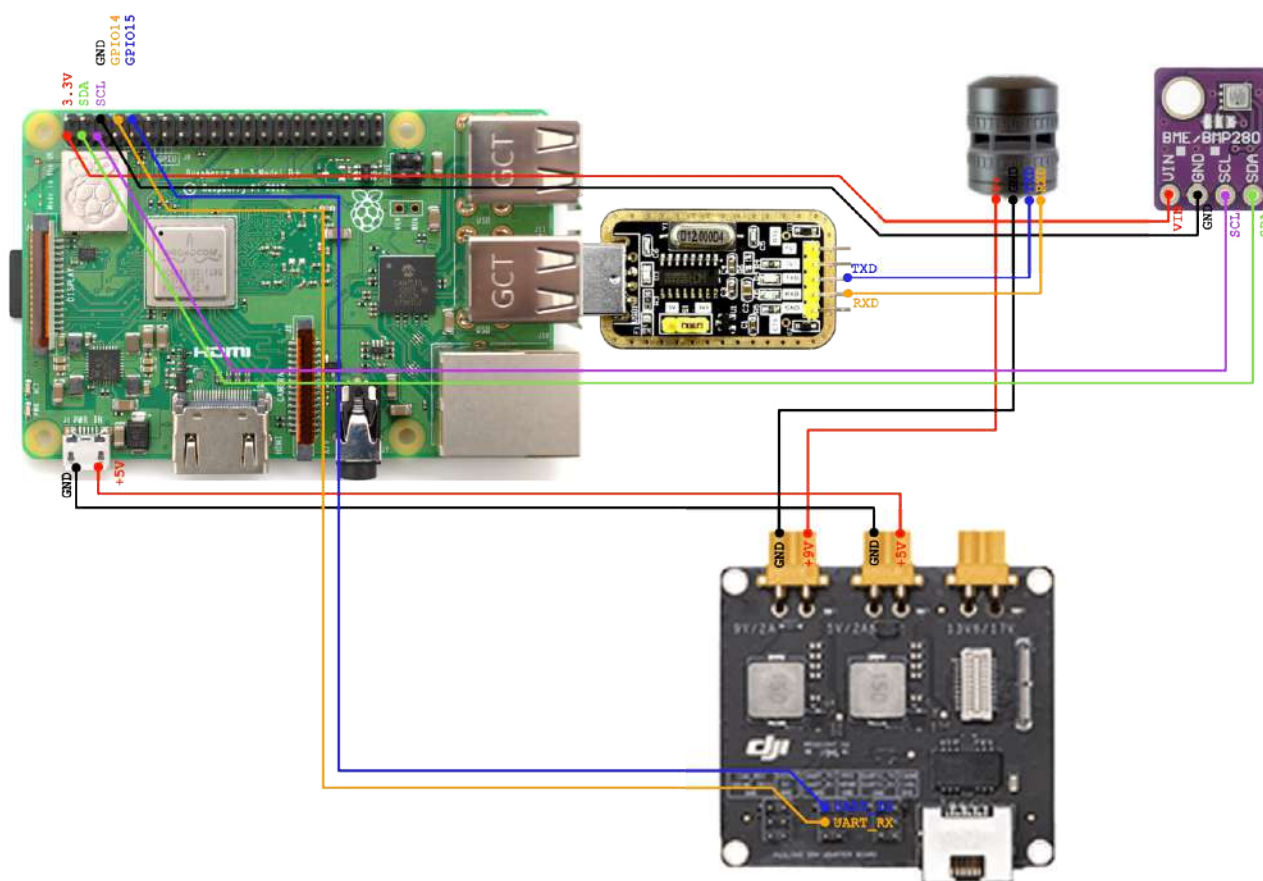


Рисунок 3.6 – Загальна схема підключення модулів метеоаналізу


```

{
  "config": {
    "ft205": {
      "port": "/dev/ttyUSB0",
      "baudRate": 9600
    },
    "psdk": {
      "port": "/dev/ttyAMA0",
      "baudRate": 115200
    },
    "bme280": {
      "busId": 1,
      "address": 119
    },
    "logStoragePath": "/home/pi/inspections",
    "finishCommand": "CMD:CANCEL",
    "startCommand": "CMD:START"
  }
}

```

Рисунок 3.7 – Приклад налаштування config.json

3.2 Реалізація системи адаптивного планування та слідування траєкторії для обльоту лопатей ВЕУ

Реалізація технології адаптивної траєкторії для інспекції лопатей ВЕУ складається з послідовності взаємопов'язаних кроків, що утворюють цикл Сприйняття – Планування – Дія – Адаптація. Складається з 6 етапів.

- 1) Ініціалізація та визначення початкової точки старту.
- 2) Сегментація компонентів вітроенергетичної установки.
- 3) Геометричний аналіз та розрахунок кута нахилу лопатей.

- 4) Вибір оптимальної траєкторії для обльоту лопатей.
- 5) Виконання траєкторії та динамічна адаптація на основі метеоаналізу.
- 6) Завершення обльоту та збір даних.

Ініціалізація та визначення початкової точки старту охоплює отримання даних про вітроенергетичну установку, зокрема її просторові координати. Головна мета цього етапу – позиціювати БПЛА в точці простору з якої можна отримати повний, безперешкодний огляд ВЕУ для первинної сегментації на її ключові компоненти, водночас повинна бути забезпечена безпечна відстань інспекції. Для ініціалізації система потребує базової інформації про ВЕУ, це можуть бути координати її центру, набір просторових координат. Координати є вхідною інформацією для системи, вони повинні бути відомі заздалегідь. Джерелами можуть слугувати проєктна документація ВЕУ (CAD-модель), або геодезичні вимірювання, до прикладу лінійно-сегментованої інспекції з використанням LIDAR сенсора, або це також можуть бути координати кінчиків лопатей.

Далі необхідно обчислити геометричний центр ВЕУ. Система обчислює центр згідно з наданими точками x_c y_c z_c розраховуються середні арифметичні координати цих точок згідно з формулою (3.1).

$$C_{\text{Центр}} = (x_c, y_c, z_c) = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k, \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k, \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N z_k \right), \quad (3.1)$$

де $C_{\text{Центр}}$ – геометричний центр;

x_c y_c z_c – середні координати по осях;

x_k y_k z_k – вхідні координати;

N – загальна кількість точок.

Наступним етапом система визначає радіус огляду, який визначає безпечну відстань для початкового огляду та охоплює максимальні габарити ВЕУ, зокрема розмах лопатей. Цей радіус обчислюється (3.2) як максимальна відстань від

розрахованого центру до будь-яких з наданих ключових точок турбіни, зазвичай кінчиків лопатей.

$$R_{\text{огляду}} = \max_{1 \leq k \leq N} \sqrt{(x_k - x_c)^2 + (y_k - y_c)^2 + (z_k - z_c)^2}, \quad (3.2)$$

де $R_{\text{огляду}}$ – радіус огляду;

x_c, y_c, z_c – середні координати по осям;

x_k, y_k, z_k – вхідні координати.

Далі необхідно розрахувати початкову точку огляду, яка буде використана для отримання початкового зображення, яке буде використано в сегментації. Початкова точка розташовується на відстані $R_{\text{огляду}}$ від центру $S_{\text{центр}}$ (3.3). Напрямок зміщення від центру обирається таким чином, щоб забезпечити найкращий огляд для первинної сегментації, як правило, це навпроти приводних механізмів, тобто фронтальна частина лопатей.

$$S_p = (x_c + R_{\text{огляду}}, y_c, z_c), \quad (3.3)$$

де S_p – початкова точка огляду;

x_c, y_c, z_c – середні координати по осях;

$R_{\text{огляду}}$ – радіус огляду.

Після обчислення точних 3D-координат початкової точки огляду система управління польотом отримує ці координати як цільову точку. З цієї точки забезпечується широкий та безперешкодний огляд усієї конструкції ВЕУ та її основних компонентів, після чого бортова камера робить початковий знімок I_m для первинної сегментації усіх компонентів ВЕУ засобами програмного модуля Detectron2.

Другим етапом є сегментація компонентів ВЕУ засобами Detectron2 на наземній станції. Для успішної сегментації засобами Detectron2 необхідно навчити модель. У процесі підготовки та навчання моделі Detectron2 для задачі сегментації компонентів вітротурбіни особливу роль відіграє створення спеціалізованого набору даних. Один з гіпотетичних прикладів такого набору даних - «Blade30» - може містити великий масив зображень турбін, отриманих під час попередніх місій дронів або з відкритих джерел. Для забезпечення якісного навчання кожне зображення має бути детально анотоване: контури таких елементів, як лопаті, гондола та башта, мають бути чітко окреслені, а кожен екземпляр повинен мати окрему полігональну маску з відповідною міткою класу.

Важливо, щоб дані були структуровані на навчальну, контрольну та тестову частини, що дозволяє не тільки навчати модель, але й контролювати якість її узагальнення та виявляти можливе перенавчання. В якості моделі для сегментації в рамках Detectron2 доцільно використовувати архітектуру Mask R-CNN, яка дозволяє ефективно розв'язувати задачу виділення екземплярів об'єктів. Зазвичай модель не навчається з нуля - замість цього використовується підхід трансферного навчання, коли за основу береться модель, раніше навчена на загальному наборі даних (наприклад, COCO) і перенавчається на цільовому наборі даних. Це значно зменшує кількість маркованих даних і прискорює процес навчання.

Під час навчання модель поступово адаптується до специфіки цільових об'єктів, багаторазово проходячи через навчальні зображення, порівнюючи передбачення з реальними анотаціями та коригуючи свої параметри. Навчання триває доти, доки результати на контрольній частині набору даних не покращаться. Після того, як модель завершена, призначається остаточна якість шляхом оцінювання її на тестовій підмножині, яка раніше не використовувалася.

На етапі використання (виведення) модель отримує новий знімок і генерує прогноз розташування та контурів об'єктів на ньому. В результаті формується набір сегментів, кожен з яких містить маску пікселів, що відображає форму виявленого компонента, обмежувальну рамку, клас об'єкта та оцінку правдивості. Ці

						КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			58

можливий шум або, або дрібні, нерелевантні об'єкти які могли бути помилково сегментовані (3.5). Контури, площа яких менше за порогове значення $A_{\text{граничне}}$ відкидаються

$$C_{\text{фільтр.}} = c_i \in C_m \mid A(c_i) > A_{\text{гранич.}}, \quad (3.5)$$

де $C_{\text{фільтр.}}$ - відфільтрований контур;

c_i – окремий контур;

C_m – початковий набір усіх контурів, знайдених функцією findContours;

$A(c_i)$ – площа окремого контура;

$A_{\text{гранич.}}$ – мінімальне порогове значення площі.

Далі відбувається процес геометричного аналізу контурів, що належать лопатям ВЕУ. На цьому етапі відбувається розрахунок мінімального обмежувального прямокутника: для кожного відфільтрованого контуру $C_{\text{фільтроване}}$ застосовується функція minAreaRect з бібліотеки OpenCV. Ця функція знаходить прямокутник мінімальної площі, який повною мірою охоплює даний контур лопаті. Оскільки лопаті мають видовжену форму і можуть бути нахилені під різними кутами, саме minAreaRect (не варто плутати звичайний прямокутний boundingRect) дозволяє найбільш точно описати їхню геометрію та орієнтацію. Далі, з отриманого об'єкта minAreaRect вилучаються координати його чотирьох вершин. Для подальшого розрахунку кута нахилу визначаються найвища ($T_{\text{верх}}$, або $(x_{\text{верх}}, y_{\text{верх}})$) та найнижча ($T_{\text{низ}}$, або $(x_{\text{низ}}, y_{\text{низ}})$) вершини цього прямокутника в системі координат зображення. Після чого на основі координат найнижчої та найвищої вершин цього обмежувального прямокутника відбувається обчислення проєкцій, різниці координат по осях x (3.6) та y (3.7).

$$\Delta x_i = x_{\text{верх},i} - x_{\text{низ},i}, \quad (3.6)$$

де Δx_i – різниця координат по осях x ;

$x_{\text{верх},i}$ – найвища точка по осі x ;

$x_{\text{низ},i}$ – найнижча точка по осі x .

$$\Delta y_i = y_{\text{верх},i} - y_{\text{низ},i}, \quad (3.7)$$

де Δy_i – різниця координат по осях y ;

$y_{\text{верх},i}$ – найвища точка по осі y ;

$y_{\text{низ},i}$ – найнижча точка по осі y .

Далі розраховується кут нахилу лопаті. Для цього використовується функція $\arctan2$ з вхідними параметрами різниці координат, повертаючи кут в діапазоні від -180° до 180° , після чого кут перетворюється (нормалізується) до зручного діапазону, до прикладу від 0° до 180° , для подальшої класифікації. Геометрія кута зображена на рисунку 3.9.

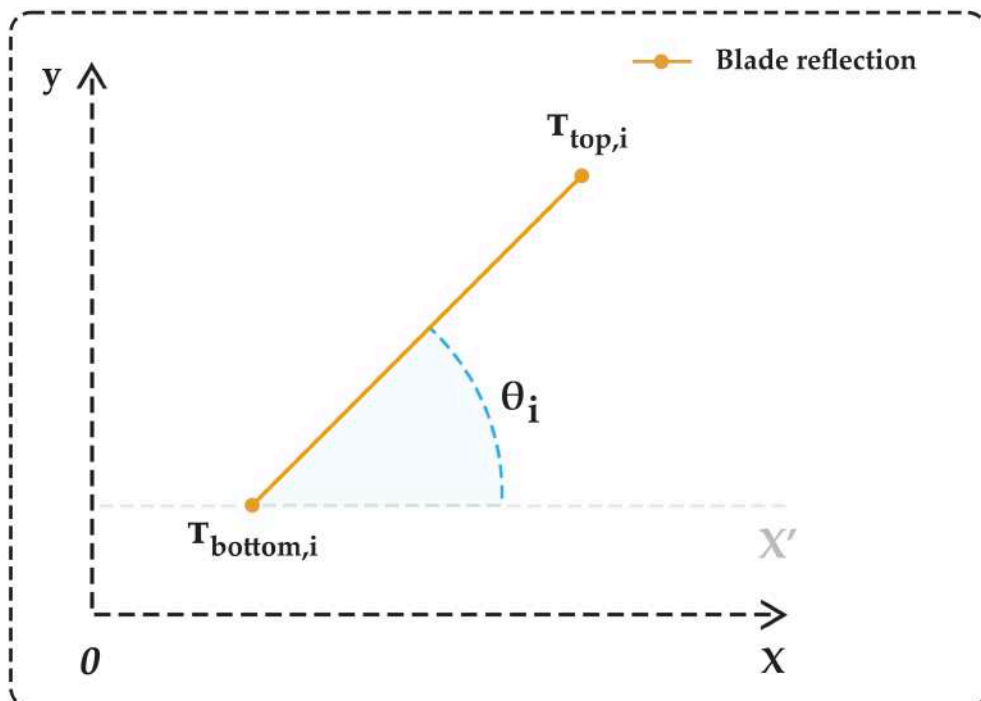


Рисунок 3.9 – Геометрія вимірювання кута

Фінальною дією цього етапу є класифікація кута нахилу лопаті, визначаються три категорії нахилу (рисунок 3.10):

- a) гострий нахил – кут нахилу в діапазоні від 30° до 60° включно або включно від 120° до 150° ;
- b) горизонтальний нахил – кут нахилу в діапазоні включно від 0° до 30° включно або включно від 150° до 180° включно;
- c) вертикальний нахил – кут нахилу в діапазоні від 60° до 120° .

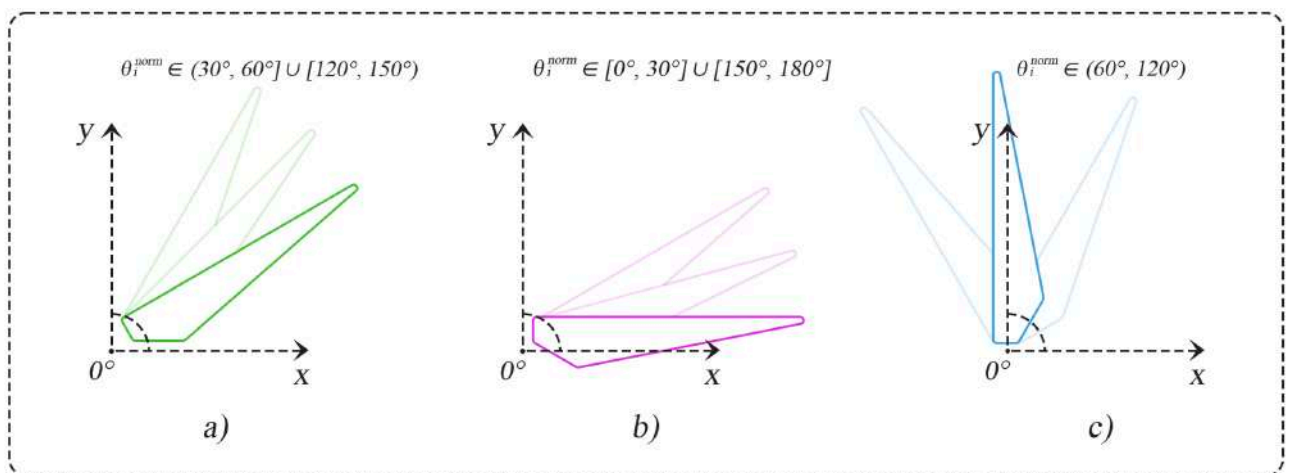


Рисунок 3.10 – Класифікація кута нахилу ВЕУ

Четвертим етапом є планування траєкторії обльоту лопатей залежно від класифікації нахилу кута. Для гострого нахилу кута лопаті використовується зміщена траєкторія описана формулою (3.8). Реалізовується шляхом руху вздовж лопаті з одночасними поперечними коливаннями для забезпечення повного покриття.

$$\Delta r(t) = \begin{bmatrix} k_x \cos(\theta_i) t \\ v_{\text{змщ.,y}} t \\ k_z \sin \omega_z t \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

де $\Delta r(t)$ – вектор зміщення;

t – поточний час;

k_x, k_z – коефіцієнти, що задають амплітуду коливань;

ω_z – кутова частота коливального руху;

$v_{\text{зміщ.,y}}$ – початкове зміщення по осі Y.

Для вертикального нахилу лопаті використовується спіральна траєкторія, описана формулою (3.9). БПЛА рухається по спіралі, що звужується навколо осі вертикально орієнтованої лопаті, забезпечуючи повний огляд її поверхні.

$$\Delta r(t) = [R_0 - k_r(t - t_0)] \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi) \\ v_{\text{зміщ.,y}}(t - t_0) \\ \sin(\omega t + \phi) \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

де $\Delta r(t)$ – вектор зміщення;

t – поточний час;

t_0 – початковий час;

R_0 – початковий радіус;

ω – кутова швидкість обертання;

ϕ – початкова фаза;

$v_{\text{зміщ.,y}}$ – початкове зміщення по осі Y.

Для горизонтального нахилу лопаті використовується гвинтовий шлях описаний формулою (3.10). БПЛА здійснює обертальний рух навколо осі горизонтально орієнтованої лопаті, одночасно переміщуючись вздовж її довжини

$$\Delta r(t) = \begin{bmatrix} R \cos(\omega t + \phi) \\ v_{\text{зміщ.,y}} t \\ R \sin(\omega t + \phi) \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

де $\Delta r(t)$ – вектор зміщення;

t – поточний час;

R – радіус гвинтової лінії;

ω – кутова швидкість обертання;

ϕ – початкова фаза;

$v_{\text{змщ.,y}}$ – швидкість лінійного зміщення по осі Y .

Результатом цього етапу є повний план польоту, що складатиметься з послідовності параметризованих сегментів траєкторії для кожної лопаті ВЕУ. Цей план польоту готовий для передачі на наступний етап.

Наступний етап починається з трансляції шляхових команд на основі траєкторій визначених на попередньому етапі у низькорівневі команди, зрозумілі для польотного контролера БПЛА. Після чого дрон починає рухатись по заданій траєкторії. Польотний контролер використовуючи дані з вбудованих навігаційних систем намагається точно слідувати отриманим польотним командам та підтримувати заданий маршрут. Під час дії цього процесу діє компенсація впливу вітру в реальному часі. Система постійно отримує дані про поточну швидкість та напрямок вітру з системи метеоаналізу яка надає швидкість вітру та розрахований (3.11) вектор швидкості повітря. Оскільки датчик ультразвуковий, він вимірює дані лише у двох площинах тому для третьої, ці дані дорівнюватимуть нулю.

$$v_{\text{вітр.}} = \begin{pmatrix} S_{\text{вітр.}} * \cos(\alpha_{\text{сен.}}) \\ S_{\text{вітр.}} * \sin(\alpha_{\text{сен.}}) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

де $v_{\text{вітр.}}$ – вектор швидкості повітря;

$S_{\text{вітр.}}$ – швидкість вітру з датчика FT205;

$\alpha_{\text{сен.}}$ – азимут напрямку вітру з анемометра.

Кінематична модель використовує рівняння руху (3.12), система постійно розраховує та задає вектор швидкості БПЛА відносно даних про швидкість та вектор вітру.

$$r(t) = r_0 + \int_{t_0}^t [v_{\text{бпла}}(\tau) - v_{\text{вітр.}}(\tau)] d\tau + \Delta r(t), \quad (3.12)$$

де $r(t)$ – вектор позиції БПЛА в момент часу t ;

r_0 – вектор початкової позиції БПЛА в момент часу t_0 ;

$v_{\text{бпла}}$ – вектор швидкості БПЛА в момент часу;

$v_{\text{вітр.}}$ – вектор швидкості вітру в момент часу;

де $\Delta r(t)$ – вектор зміщення згідно з вибраною траєкторією.

Система точного стеження використовує високоточне супутникове позиціонування (RTK) в поєднанні з алгоритмами компенсації вітру. Це дозволяє системі підтримувати стабільну відстань до об'єкта спостереження, а також дотримуватися заданих кутів огляду під час польоту. Це забезпечує високу якість зібраних даних, що особливо важливо для інспекцій об'єктів зі складною геометрією.

Крім того, система може адаптувати свою поведінку в режимі реального часу, використовуючи зображення, отримані з камери дрона. Такий підхід реалізований у вигляді замкнутого контуру управління, де візуальна інформація постійно аналізується під час польоту. Якщо виявляється, що положення об'єкта, кут огляду або відстань до нього відрізняються від очікуваних параметрів, траєкторія може бути автоматично скоригована. Це охоплює як невеликі зсуви положення дрона, так і зміну орієнтації камери за допомогою карданного підвісу для підтримки необхідного кута.

Під час польоту дрон активно збирає інформацію за допомогою сенсорного обладнання. Камера з високою роздільною здатністю знімає візуальні зображення та відео, а тепловізор фіксує температурні характеристики об'єкта. Всі дані зберігаються локально на бортовому накопичувачі дрона і згодом використовуються для детального аналізу стану споруд.

Після завершення огляду окремого компонента, однієї з лопатей, БПЛА зазвичай повертається до заздалегідь визначеної контрольної точки. Це може бути як початкова точка місії, так і інша проміжна позиція, обрана для забезпечення зручного переходу до наступного етапу. Такий маневр виконується за заздалегідь розрахованою плавною траєкторією, що забезпечує безпечний рух і плавні переходи між етапами. Побудова такої траєкторії може базуватися, зокрема, на поліноміальних функціях для досягнення оптимальної динаміки руху.

Повернення до опорної точки також дозволяє оновити загальне уявлення про об'єкт огляду, особливо в тих випадках, коли між оглядами різних частин пройшов певний час або могли змінитися умови навколишнього середовища. Після досягнення точки орієнтування система аналізує статус місії, зокрема, перевіряє, які компоненти вже були перевірені, а які ще перебувають у черзі. Цей облік може здійснюватися у вигляді черги або списку із зазначенням номерів лопатей, наприклад: лопать 1, лопать 2, лопать 3. Якщо виявляється, що є ще неперевірені елементи, система автоматично ініціює новий цикл перевірки для наступного компонента. У разі змін у геометрії, наприклад, при перевірці лопаті, положення якої могло змінитися, система може повторно виконати сегментацію і геометричний аналіз, щоб визначити поточне положення елемента. Для кожної нової лопаті генерується або вибирається відповідна траєкторія польоту. Після цього БПЛА виконує польотне завдання з урахуванням необхідної адаптації до умов вітру, орієнтації камери та інших параметрів. Такий ітеративний підхід забезпечує поетапне, логічно впорядковане обстеження всіх лопатей ВЕУ. Коли система підтверджує, що всі компоненти були успішно перевірені, місія вважається завершеною. БПЛА виконує фінальний політ до місця посадки або повертається на вихідну позицію. Результатом інспекційної місії є структурований набір даних, який включає:

- високоякісні RGB-зображення та/або відео з різних ракурсів;
- тепловізійні дані у вигляді зображень або відео з інформацією про температуру;

						КвРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			66

– супутні метадані: координати фотовідео фіксації (з точністю RTK), позначки часу, параметри польоту, орієнтація дрона та інші історичні файли.

Всі ці матеріали зберігаються на борту БПЛА або передаються на наземну станцію управління для подальшої обробки, аналізу технічного стану обладнання та прийняття рішень щодо технічного обслуговування або ремонту. Загальний алгоритм роботи системи адаптивного планування зображено на рисунку 3.11.

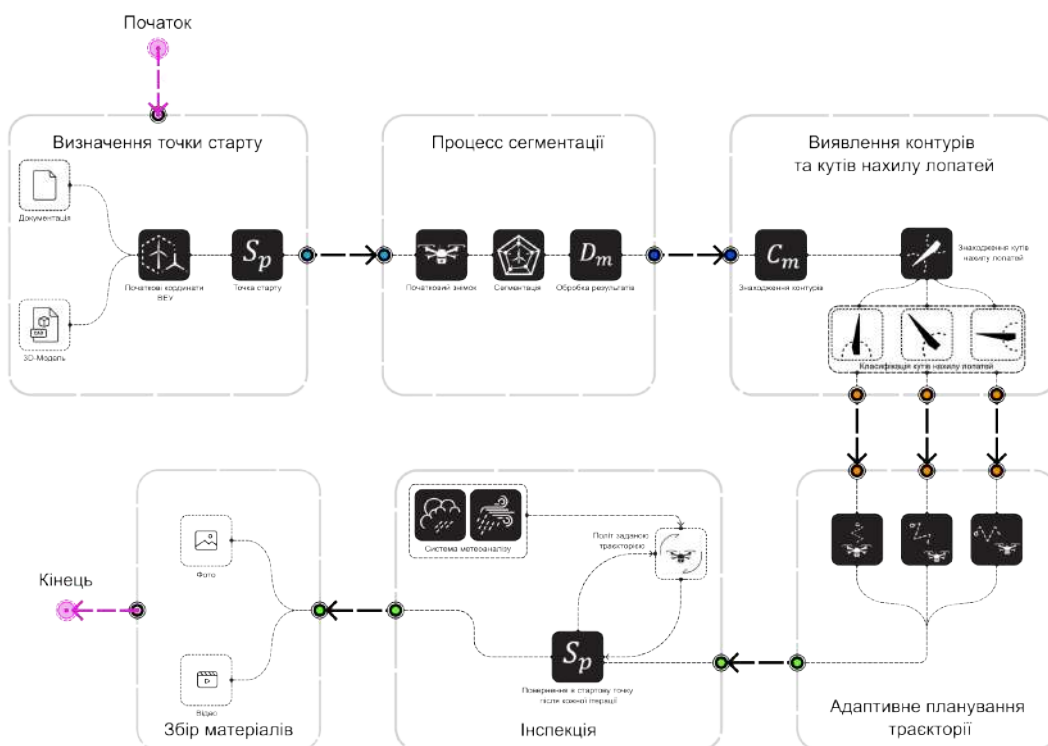


Рисунок 3.11 – Алгоритм роботи системи адаптивного планування траєкторій.

3.3 Результати тестування кіберфізичної системи у віртуальному середовищі

На момент написання цієї роботи польоти цивільних БПЛА обмежені законодавством, тому було прийнято рішення тестувати розроблену систему за допомогою побудованого віртуального середовища у симуляторі БПЛА AirSim.

AirSim – це open-source симулятор для дронів, автомобілів та інших автономних транспортних засобів. Він був розроблений компанією Microsoft AI & Research. Цей симулятор побудовано на основі ігрового рушія Unreal Engine.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Завдяки фотореалістичній візуалізації AirSim дозволяє відтворювати складні 3D сцени з реалістичним освітленням що буде корисним при тестуванні в різних погодних умовах. Це дозволить повною мірою протестувати модуль сегментації компонентів ВЕУ, знаходження куту нахилу лопатей та знаходження їх площин. Також в даному симуляторі є можливість задавати параметри вітру, хоча і немає можливості протестувати датчики повною мірою, дані для них можна обрахувати програмно та передати синтетичні дані, які очікуються від Raspberry PI.

Було проведено два експерименти. В першому випадку використовувались традиційні, неавтоматизовані методи інспекції ВЕУ засобами БПЛА. Перший експеримент проводився в номінальних погодних умовах, швидкість вітру сягала 5 – 7 м/с. Другий експеримент проводився у вітряних умовах, де швидкість вітру становила 14-16 м/с. що є більшим ніж граничні технічні характеристики БПЛА Matrice 350 RTK, для перевірки системи метеоаналізу. Порівнявши результати тестування традиційних методів (табл. 3.5) та розробленої системи (табл. 3.6) видно що в середньому відхилення від траєкторії менше на 1.15 м в середньому та максимальне на 3.13 м що менше на у більше ніж 4 рази.

Таблиця 3.5 – Результати першого експерименту традиційними методами

Нахил лопаті	Середнє відхилення (м)	Відстань (м)	Стабільна швидкість (%)	Максимальне відхилення (м)
Вертикальний	1.58	1126.73	77.43	4.12
Горизонтальний	1.26	1085.24	80.57	3.55
Гострий	1.47	1103.14	79.01	3.91

Таблиця 3.6 – Результати першого експерименту розробленої системи

Нахил лопаті	Середнє відхилення (м)	Відстань (м)	Стабільна швидкість (%)	Максимальне відхилення (м)
Вертикальний	0.31	1065.43	90.28	0.78
Горизонтальний	0.24	1043.38	91.91	0.65

Продовження таблиці 3.6

Гострий	0.26	1050.52	90.89	0.75
---------	------	---------	-------	------

Другий експеримент виявив різочу перевагу у часі тестування, кількості виправлень, та впливу оточення. Час інспекції знизився у більше ніж 2 рази, водночас точність вище в середньому майже на 10% при кількості виправлень в середньому на 15 разів менше.

Таблиця 3.7 – Результати другого експерименту традиційних методів

Нахил лопаті	Точність (%)	Час (хв)	Кількість виправлень	Вплив оточення (%)	Швидкість вітру (м/с)
Вертикальний	85.25	25.04	24	82	14.78
Горизонтальний	85.98	23.52	21	76	14.22
Гострий	86.39	24.41	23	77	13.96

Таблиця 3.8 – Результати другого експерименту розробленої системи

Нахил лопаті	Точність (%)	Час (хв)	Кількість виправлень	Вплив оточення (%)	Швидкість вітру (м/с)
Вертикальний	95.13	9.09	8	47	15.23
Горизонтальний	96.09	8.32	7	45	14.58
Гострий	95.42	8.56	6	46	14.02

3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було детально описано процес програмно-апаратної реалізації системи адаптивного планування траєкторії БПЛА для інспекції вітроенергетичних установок та її тестування. Детально описана реалізація модуля метеоаналізу який побудований на основі одноплатного комп'ютера RaspberryPI 3 Model B який поєднує усі датчики в цілісну систему. Датчик анемометр FT205 який

вимірює напрям вітру та його силу ідеально підходить для системи оскільки не має рухомих частин та здатен точно виміряти умови виконання інспекції, датчик вологи Bosch BME 280 доповнює його надаючи дані про вологу, атмосферний тиск що допоможе передбачити дощ. Ці дані обробляються на Raspberry PI та передаються на наземну станцію управління БПЛА за допомогою PSDK Adapter board. Adapter board також дозволяє забезпечити живлення усіх компонентів системи оскільки має декілька вихідних напруг. Система метеоаналізу також здатна записувати усі дані в режимі реального часу що дозволить проаналізувати умови під час польотної місії. Розроблене програмне забезпечення дозволяє записувати історичні дані, формувати вектор швидкості на основі показань бортових датчиків.

Також було впроваджено адаптивну систему планування траєкторій, яка перед початком роботи на основі даних документації визначає точку старту інспекції, далі завдяки контрольного знімка виконує сегментацію усіх компонентів ВЕУ для знаходження лопатей, основної цілі інспекції, виконує складні математичні операції для знаходження граничних точок лопатей, визначає їх кут нахилу, та класифікує яку траєкторію обрати під певний кут нахилу лопаті. Далі система проводить інспекцію по заданій траєкторії, водночас компенсує пориви вітру які можуть бути при інспекції в різноманітних погодних умовах, беручи за основу розрахований вектор вітру, наданий системою метеоаналізу. Після чого повертається у стартову точку, та проаналізувавши чи не змінився кут нахилу лопатей продовжує інспекцію наступних лопатей. Після повернення на землю льотна платформа надає точні відео та фото матеріали інспекції, проаналізувавши які, персонал може приймати рішення про необхідність, або її відсутність, технічного обслуговування або ремонту вітроенергетичної установки.

Кіберфізичну систему було протестовано за допомогою віртуального середовища AirSim та було доведено її високу ефективність в порівнянні з традиційними методами інспекцій ВЕУ вручну, або за допомогою БПЛА.

										КвРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

ВИСНОВКИ

У роботі на основі результатів теоретичних та практичних досліджень було розроблено та реалізовано архітектуру та ключові компоненти кіберфізичної системи адаптивного планування траєкторії БПЛА для інспекції вітроенергетичних установок, яка враховує конструктивні особливості лопатей ВЕУ та динамічні погодні умови внаслідок інтеграції власного модуля метеорологічного аналізу. Запропонована система спрямована на підвищення ефективності, безпеки та точності інспекційних місій.

У першому розділі проаналізовано проблеми та чинні підходи до інспектування ВЕУ за допомогою БПЛА. Встановлено, що великі габарити, наявність рухомих частин та складні аеродинамічні умови ускладнюють планування безпечних траєкторій. Огляд чинних методів побудови траєкторій (спіральна, лінійна сегментована та польоту окремих лопатей) виявив їх переваги та недоліки, але жоден з них не є універсальним для ефективної інспекції в реальних, змінних умовах. Виходячи з цього, було обґрунтовано необхідність розробки адаптивного підходу до планування траєкторії, взявши за основу та розширивши підхід, представлений в роботі Свистуна С. та співавторів [1], шляхом інтеграції додаткових датчиків для покращення адаптації до погодних умов. Також було проаналізовано критерії вибору БПЛА та, виходячи з тривалості польоту, опору вітру, підтримки RTK/GNSS, систем обходу перешкод, сумісності з професійним обладнанням та наявності SDK/API, було обрано RTK-платформу DJI Matrice 350 як оптимальну для вирішення поставлених завдань.

У другому розділі було проведено детальне проєктування архітектури кіберфізичної системи, що розробляється. Було визначено ключові апаратні компоненти, серед яких польотна платформа DJI Matrice 350 RTK з її навігаційними можливостями (RTK) та системою передачі даних, а також мультисенсорне корисне навантаження Zennuse H20T для візуального та тепловізійного обстеження. Розглянуто підхід до моніторингу погоди, який

										КвРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк.
											71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

поєднує оцінку вітру на борту безпілотної літака та можливість інтеграції зовнішніх датчиків через власний модуль метеорологічного аналізу. Визначено основні програмні інструменти: бібліотеки комп'ютерного зору Detectron2 (для сегментації компонентів вітрогенератора) та OpenCV (для обробки масок та вилучення геометричних параметрів), а також програмне забезпечення екосистеми DJI, зокрема DJI Pilot 2 та ключова роль DJI Payload SDK (PSDK) для реалізації унікальної логіки системи, включаючи програмне керування польотом, взаємодію з датчиками та алгоритми компенсації вітру. Запропонована архітектура забезпечує необхідну взаємодію апаратних і програмних компонентів для сприйняття навколишнього середовища, аналізу стану лопатей вітроенергетичних установок та погодних умов, адаптивного планування і точного виконання траєкторій польоту.

У третьому розділі описано апаратну та програмну реалізацію ключових елементів розробленої кіберфізичної системи. Детально описано створення модуля метеорологічного аналізу на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 3 Model B, з інтеграцією анемометра FT205 та датчика температури/вологості/тиску Bosch BME280, та його підключення до БПЛА DJI Matrice 350 RTK за допомогою плати PSDK Adapter (E-Port Development Kit) для передачі даних та живлення. В рамках додатка наземної станції були реалізовані програмні модулі для сегментації компонентів ВЕУ (з використанням Detectron2 та OpenCV), розрахунку кутів нахилу лопатей, адаптивного вибору траєкторій на основі цих кутів (за методикою, описаною в статтях) та корекції траєкторії з урахуванням даних від розробленого модуля метеорологічного аналізу. Описаний процес включає визначення початкової точки, сегментацію, розрахунок кутів, вибір траєкторії, перевірку з урахуванням вітру та ітераційне продовження для наступних лопатей, з остаточним наданням точних фото та відеоматеріалів.

						КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк. 72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Svystun S., Scislo L., Pawlik M., Melnychenko O., Radiuk P., Savenko O., Sachenko A. DyTAM: Accelerating Wind Turbine Inspections with Dynamic UAV Trajectory Adaptation. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 7. Art. no. 1823. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18071823>.

2. Свистун С. О., Мельниченко О. В., Скрипник Т. К. Проектування робочої місії безпілотних літальних апаратів в тривимірному просторі. *Збірник наукових праць за матеріалами XV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2023»*, м. Хмельницький, 17-18 листопада 2023 р. Хмельницький, 2023. С. 269–274.

3. Melnychenko O., Savenko O. A self-organized automated system to control unmanned aerial vehicles for object detection. The 4th International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS-2023) : CEUR-Workshop Proceedings. Vol. 3373 (Khmelnyskyi, Ukraine, 22–24 March 2023). *Aachen: CEUR-WS.org*, 2023. P. 589–600. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3373/paper40.pdf>.

4. Zhang K., Pakrashi V., Murphy J., Hao G. Inspection of floating offshore wind turbines using multi-rotor unmanned aerial vehicles: a literature review and trends. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 3. Art. no. 911. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24030911>.

5. Virtanen E. A., Lappalainen J., Nurmi M., Viitasalo M., Tinanmaki M., Heinonen J., Atlaskin E., Kallasvuo M., Tikkanen H., Moilanen A. Balancing profitability of energy production, societal impacts and biodiversity in offshore wind farm design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 158. Art. no. 112087. DOI: <http://doi.org/10.9734/jerr/2021/v20i1017388>.

6. Melnychenko O., Scislo L., Savenko O., Sachenko A., Radiuk P. Intelligent integrated system for fruit detection using multi-UAV imaging and deep learning. *Sensors*. 2024. Vol. 24. Art. no. 1913. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24021913>.

										КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк. 73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

7. Svystun S., Melnychenko O., Radiuk P., Savenko O., Sachenko A., Lysyi A. Dynamic trajectory adaptation for efficient UAV inspections of wind energy units. *arXiv:2411.17534*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.17534>
8. Svystun S., Melnychenko O., Radiuk P., Savenko O., Sachenko A., Lysyi A. Thermal and RGB Images Work Better Together in Wind Turbine Damage Detection. *Int. J. Comput.* 2024. Vol. 23. P. 526–535. DOI: <http://dx.doi.org/10.47839/ijc.23.4.3752>.
9. Melnychenko O., Savenko O., Radiuk P. Apple detection with occlusions using modified YOLOv5-v1. *IEEE*, 2023. P. 107–112. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348779>.
10. Ghaedi K., Gordan M., Ismail Z., Hashim H., Talebkhah M. A literature review on the development of remote sensing in damage detection of civil structures. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2021. Vol. 20, No. 10. P. 39–56. DOI: <https://doi.org/10.9734/jerr/2021/v20i1017388>.
11. Roga S., Bardhan S., Kumar Y., Dubey S. K. Recent technology and challenges of wind energy generation: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 52. Art. no. 102239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102239>.
12. Badihi H., Zhang Y., Jiang B., Pillay P., Rakheja S. A comprehensive review on signal-based and model-based condition monitoring of wind turbines: Fault diagnosis and lifetime prognosis. *Proceedings of the IEEE*. 2022. Vol. 110, No. 5. P. 754–806. DOI: <https://doi.org/10.1109/jproc.2022.3171691>.
13. Stanescu D., Digulescu A., Ioana C., Candel I. Early-warning indicators of power cable weaknesses for offshore wind farms. Proceedings of the OCEANS 2023 – MTS/IEEE U.S. Gulf Coast, Biloxi, MS, USA, 25–28 September 2023. Biloxi, MS: *IEEE*, 2023. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.23919/oceans52994.2023.1033737>
14. Garg P. K. Characterisation of fixed-wing versus multirotors UAVs/Drones. *Journal of Geomatics*. 2022. Vol. 16, No. 2. P. 152–159. DOI: <https://doi.org/10.58825/jog.2022.16.2.44>.

15. Zhang Z., Shu Z. Unmanned aerial vehicle (UAV)-assisted damage detection of wind turbine blades: A review. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 15. Art. no. 3731. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17153731>.

16. Zhang H. et al. Wind turbine fault detection based on multi-sensor data fusion using random forest and CNN. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 185. P. 293–303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.091>.

17. DJI. Matrice 350 RTK – FAQ [Електронний ресурс]. URL: <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk/faq> (дата звернення: 14.05.2025).

18. DJI. Mavic 3 Enterprise – Технічні характеристики [Електронний ресурс]. URL: <https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs> (дата звернення: 14.05.2025).

19. Autel Robotics. Autel Dragonfish – Офіційна сторінка продукту [Електронний ресурс]. URL: <https://auteldronesbaltic.com/ru/dragonfish-series-ru/autel-dragonfish/> (дата звернення: 14.05.2025).

20. Unitop. Skydio X2 – Безпілотна система [Електронний ресурс]. URL: <https://unitop.ua/skydio-x2/> (дата звернення: 14.05.2025).

21. Flyability. Elios 3 – Інспекційний дрон для закритих приміщень [Електронний ресурс]. URL: <https://www.flyability.com/elios-3> (дата звернення: 14.05.2025).

22. Свистун С. О. Розподілена архітектура системи управління та навігації БПЛА. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. 2024. Т. 345, № 6(2). С. 120–124. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-345-6-18>.

23. Svystun S. et al. Dynamic trajectory adaptation for efficient UAV inspections of wind energy units. 2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2024) : Proceedings, Athens, Greece, 11–13 October 2024 / ed. by V. Kharchenko et al. New York : *IEEE*, 2024. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.17534>.

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк. 75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

33. Pham H. X. et al. A review of deep learning for UAV-based solutions: from training to deployment. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2021. Vol. 32, No. 10. P. 4563–4581. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.3009910>.

34. Gu X. et al. An adaptive autonomous multi-drone inspection system for large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 150. Art. no. 111487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111487>.

35. Zeng Y. et al. Deep learning for reliable UAV trajectory design in wireless communication: a spatiotemporal prediction system. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020. Vol. 19, No. 9. P. 6060–6076. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2992116>.

36. Tan X. et al. Deep reinforcement learning for intelligent UAV navigation in dynamic environments. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 124308–124321. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3006853>.

37. Yang Y. et al. Deep Learning Methods for UAV Power Line Inspection. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. Vol. 35, No. 6. P. 2631–2640. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.2973076>.

38. Kim S. et al. A review of deep learning methods for anomaly detection in manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 63. P. 832–850. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.03.001>.

39. Li K. et al. Deep learning-based intelligent fault diagnosis methods for rotating machinery: a review. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. Vol. 31, No. 2. P. 433–452. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01425-4>.

40. Hanam A. et al. A review of machine learning methods for condition monitoring and predictive maintenance of wind turbines. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 169506–169531. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024087>.

41. Zhang Y. et al. Data-driven predictive maintenance methods for wind turbines: a review. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 163. P. 1145–1160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.069>.

42. Liu R. et al. Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using a novel hybrid deep learning model. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 144. Art. no. 106885. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106885>.

43. Microsoft. AirSim [Електронний ресурс]. URL: <https://microsoft.github.io/AirSim/> (дата звернення: 15.05.2025).

44. ArduPilot.org. Using SITL with AirSim [Електронний ресурс]. URL: <https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-with-airsim.html> (дата звернення: 15.05.2025).

45. FT Technologies Ltd. FT205 Wind Sensor Datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/wp-content/uploads/2017/07/FT205-Wind-Sensor-Datasheet.pdf> (дата звернення: 14.05.2025).

46. BOSCH. BME280 Datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132060/BOSCH/BME280.html> (дата звернення: 14.05.2025).

47. Facebook AI Research. Detectron2 [Електронний ресурс]. URL: <https://github.com/facebookresearch/detectron2> (дата звернення: 15.05.2025).

48. OpenCV.org. OpenCV - Open Computer Vision Library [Електронний ресурс]. URL: <https://opencv.org> (дата звернення: 14.05.2025).

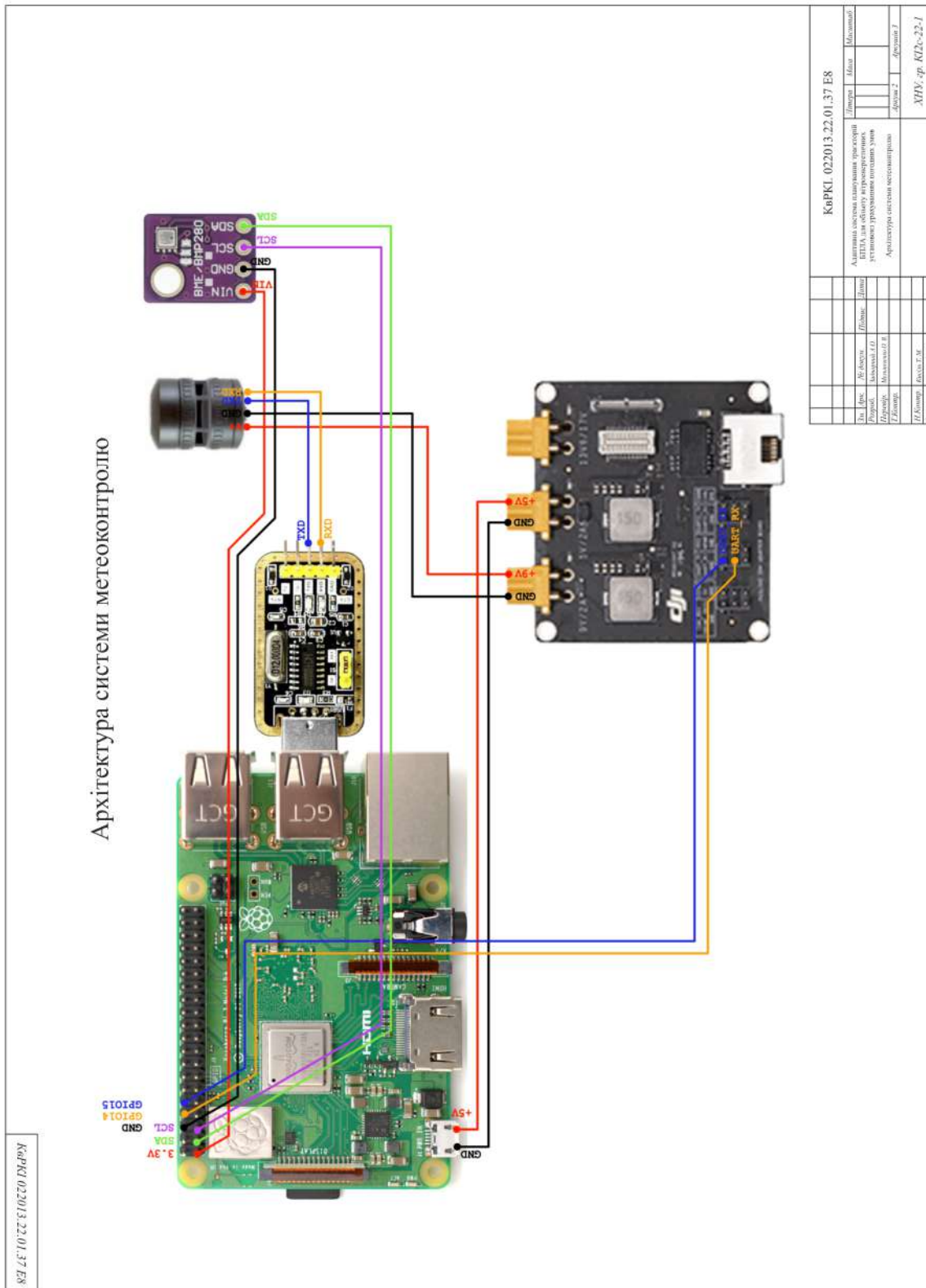
49. Raspberry Pi Foundation. config.txt [Електронний ресурс]. URL: https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/config_txt.html (дата звернення: 14.05.2025).

50. MPS. MP1482DS Datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/551573/MPS/MP1482DS.html> (дата звернення: 14.05.2025).

					КВРКІ 022013.22.01.37 ПЗ	Арк. 78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

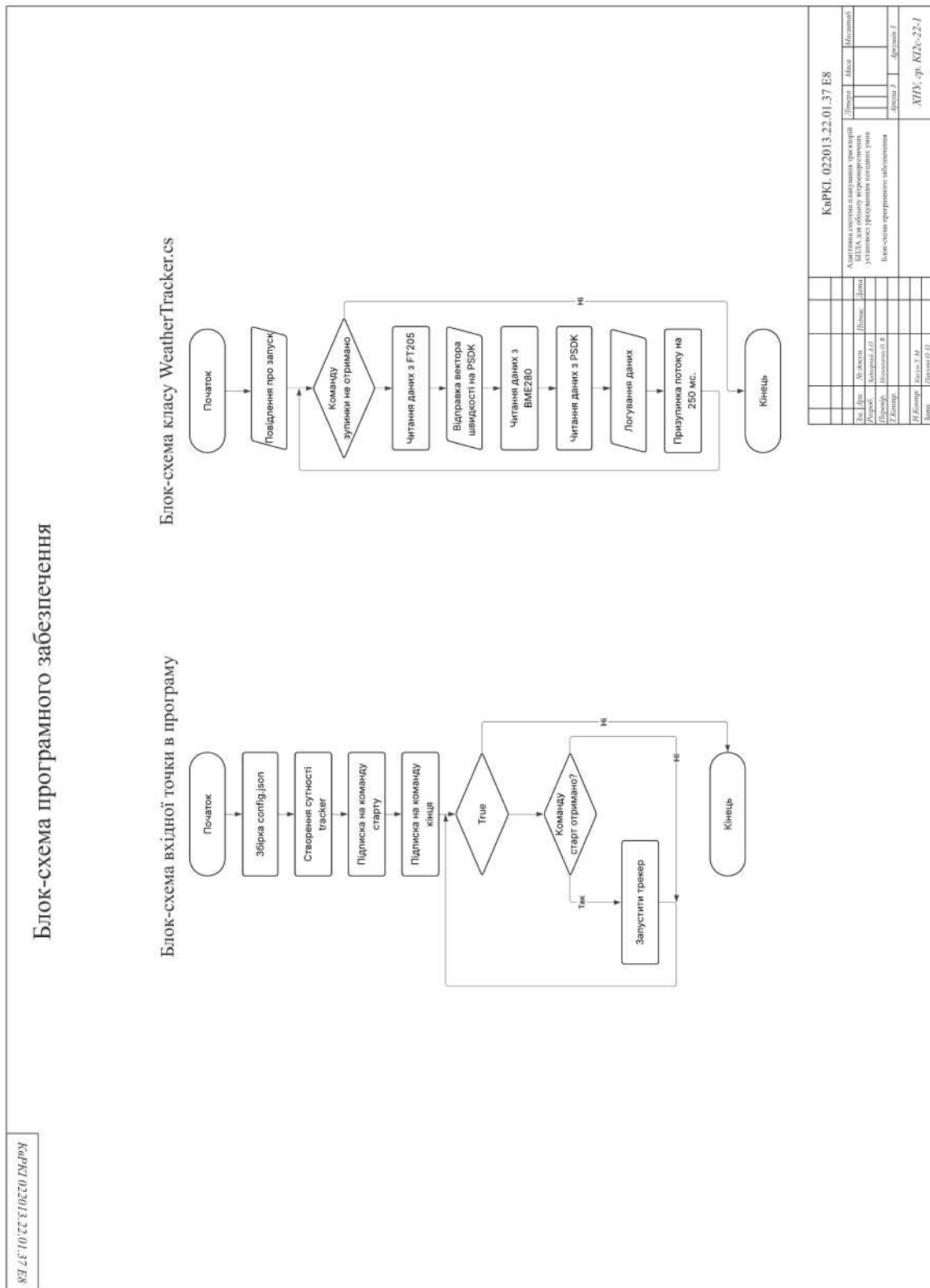
Додаток Б (обов'язковий)

КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ МЕТЕОКОНТРОЛЮ»



Додаток В (обов'язковий)

КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «БЛОК-СХЕМА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ»



Додаток Г (обв'язковий)

ВИХІДНИЙ КОД

Вихідний код, що використаний в роботі є відкритим та загальнодоступним у репозиторії GitHub:

Zadvornyi A. azadvornyi2/WeatherTrackingSystem. GitHub URL: <https://github.com/azadvornyi2/WeatherTrackingSystem> (Дата звернення: 15.05.2025)

На рисунку Г.1 зображено знімок екрану репозиторію.

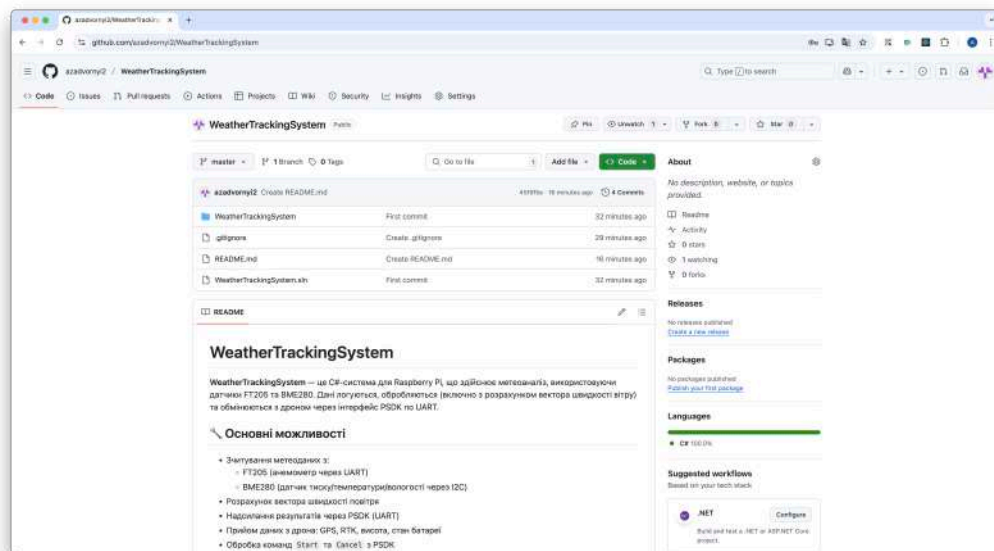


Рисунок Г.1 – Головна сторінка сторінка репозиторію GitHub з вихідним кодом розробленої системи

Репозиторій містить програмний код що реалізує систему метеоаналізу на основі датчика анемометра та датчика вологи, передає дані на бортову систему дрона за допомогою PSDK по протоколу UART, веде запис погодних даних містить в собі проєкт:

– WeatherTrackingSystem – аналіз погодних умов, побудова вектора швидкості, передача даних на льотну платформу, запис даних у польоті та збереження у пам'яті Raspberry Pi, .Net Core 8, C#.

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: Андрій ЗАДВОРНИЙ

Співавтор:

Назва: Задворний_Адаптивна система планування траєкторій БПЛА для обльоту лопатей вітроенергетичних установок з урахуванням погодних умов **Експерт:**

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1:4.4%

Коефіцієнт подібності 2:1%

Мікропробіли: 5

Заміна букв: 41

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-05-29 17:15:22.0

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 укріплення 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:

2025-05-29

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 11.0%

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

ID: 242454 Title: БРР Адаптивна система планування траєкторій БПЛА для об'їзду локалей вітросенсорних установок з урахуванням погодних умов Added in a DB: 2025-05-29 Author: Андрій ЗАДВОРИЙ Head: Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	92139	797	12444 (14%)	133 (17%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes
240970	Title: Звіт з ППП Адаптивна система планування траєкторій БПЛА для об'їзду локалей вітросенсорних установок з урахуванням погодних умов Added in a DB: 2025-05-09 Author: Задворний А.О. Head: Мельниченко О.В. Consultants: Opponents:	10221 (11.0%)	108 (14.0%)

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувач: Задворний Андрій Олегович

Тема: Адаптивна система планування траєкторій БПЛА для обльоту лопатей вітроенергетичних установок з урахуванням погодних умов

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 82

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень. Метою кваліфікаційної роботи є покращення ефективності обльоту БПЛА лопатей вітроенергетичних установок шляхом розробки адаптивної системи планування траєкторій, що враховує погодні умови

2. Висновок про відповідність роботи завданню кваліфікаційної роботи. Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи. В першому розділі проведено дослідження предметної області, проаналізовано конструктивні особливості ВЕУ, проблеми їх інспекції, типові траєкторії обльоту. Також проведено аналіз критерії вибору БПЛА для інспекції. Розділ демонструє ознайомлення з актуальними проблемами та існуючими підходами в галузі. В другому розділі роботи розроблено архітектуру кіберфізичної системи, детально описане апаратне забезпечення, БПЛА DJI Matrice 350 RTK, навігаційну систему з акцентом на RTK, систему управління та передачі даних DJI O3 Enterprise Transmission, сенсорне обладнання DJI Zenmuse H20T, підхід до моніторингу погодних умов та наземну платформу управління з GPU Nvidia RTX 4060 Ti для обчислень ШІ. Також розглянуто програмне забезпечення, бібліотеку комп'ютерного зору Detectron2 для сегментації, бібліотеку OpenCV для геометричного аналізу, програмне забезпечення екосистеми DJI, включаючи Payload SDK (PSDK) для інтеграції власних рішень, та архітектуру модуля метеоаналізу з використанням зовнішніх датчиків (анемометр FT205, датчик

вологості BME280) та Raspberry Pi 3B+. Цей розділ демонструє використання сучасних технологій та комплексний підхід до проєктування системи. В третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано апаратну та програмну реалізацію системи метеоаналізу та систему адаптивного планування траєкторій, проведено тестування в умовах віртуального середовища AirSim.

4. Позитивні сторони роботи. Висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи. Тестування проводилось виключно у віртуальному середовищі AirSim.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи. Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому. З огляду на високий рівень виконання та забезпечення всіх необхідних вимог вважаю, що подана кваліфікаційна робота бакалавра може бути допущена до захисту.

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи бакалавра: добре

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

Гадюк Павло Михайлович, доц. дрін., старший
виклад кафедри комп'ютерних наук

“ ___ ” _____ 2025 р.

 (підпис)

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

Андрія ЗАДВОРНОГО

ПІБ 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.

29.05 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: Адаптивна система планування траєкторій БПЛА для обльоту лопатей вітроенергетичних установок з урахуванням погодних умов

Автор: Андрій ЗАДВОРНИЙ

Спеціальність: 123– Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО, д.ф.

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

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

Підтвердження:

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

- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з 10-40 джерелами на один фрагмент речення;
- 4) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 4.43% і адресується до 41 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 11%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОІІ

Завідувач кафедри КІС



Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО

Андрій НІЧЕПОРУК

Ольга ПАВЛОВА