

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з
GPS навігацією
Назва теми

КВРКІ 022026.22.02.02 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 КІС-22-2  Ростислав МИХАЙЛОВСЬКИЙ

Підпис

Ініціали, прізвище

Керівник



Підпис, дата

Олег САВЕНКО

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер



Підпис, дата

Тетяна КИСІЛЬ

Ініціали, прізвище

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



Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

«12» 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

Ростиславу МИХАЙЛОВСЬКОМУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією

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

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

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

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

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

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____
Аналіз структури та функціональних вимог до кіберфізичної системи адаптивного застосування моніторингових елементів розвідувального БПЛА і постановка задачі щодо її вдосконалення

Розроблення інформаційної підсистеми обробки даних у складі кіберфізичної системи адаптивного застосування моніторингових елементів розвідувального БПЛА

Програмно-апаратна реалізація прототипу кіберфізичної системи з адаптивним використанням моніторингових засобів розвідувального БПЛА 5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Блок-схема алгоритму _____

Принципова схема системи _____

Структурна схема системи _____

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання виконав
Нормоконтроль	Тетяна КИСІЛЬ, доцент кафедри КПС		
Антиплагіат	Андрій ПІЧЕПОРУК, 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)	Проміжок
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2025	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проєктування системи розвідувального БПЛА	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – проєктування системи застосування БПЛА для об'льоту повітряних турбін.	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

Ростислав МИХАЙЛОВСЬКИЙ

Підпис

Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Олег САВЕНКО

Підпис

Ініціали, прізвище

№ р я д к а	Ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л - л и с т і в	№ с к з	П р и м і т к а
			<u>Текстові документи</u>			
1		КвРКІ 022026.22.02.01 ПЗ	Пояснювальна записка	64		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КвРКІ 022026.22.02.01 Е8	Принципово-електрична схема дрона	1		
3		КвРКІ 022026.22.02.01 Е8	Блок-схема алгоритму автономного польоту	1		
		КвРКІ 022026.22.02.01 Е8	Структурна схема зв'язків компонентів системи			
			БПЛА			
			БПЛА			

КвРКІ.022026.22.02.02 ВП				
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата
Розробив		Михайловський		
Перевір.		Савенко		
І.контр.		Кисіль		10.08.24
Затв.		Павлова		10.08.24
Відомість проекту			Літера	Аркуш
			У	1
			ХНУ, КІ2с-22-2	

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією».

Автор роботи: Михайловський Ростислав Володимирович

Керівник роботи: Савенко Олег Станіславович.

Пояснювальна записка: 64 с., 6 рис., 4 табл., 50 джерел.

Графічна частина: 2 креслення.

Мета дослідження – визначення умов та особливостей застосування безпілотного літального апарата як елементу кіберфізичної системи для інспекції вітрових турбін, а також оцінка ефективності механізмів стабілізації, навігації та збору інформації для забезпечення надійного виявлення дефектів конструкцій.

Об'єктом дослідження є функціонування кіберфізичної системи моніторингу вітрових турбін з використанням БПЛА.

Предметом дослідження є структурно-функціональні характеристики системи керування польотом, збору та обробки даних у процесі автономного обльоту турбіни БПЛА.

Методом дослідження є систематичний огляд науково-технічної літератури та аналіз сучасних рішень у сфері автономного моніторингу вітроенергетичних об'єктів із використанням безпілотних літальних апаратів.







Підпис студента

30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА АДАПТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МОНІТОРИНГОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗВІДУВАЛЬНОГО БПЛА ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ЩОДО ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ.....	5
1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей кіберфізичної системи інспекції вітрових турбін з використанням безпілотного літального апарата	5
1.2 Аналіз алгоритмічних і апаратно-програмних засобів керування кіберфізичною системою автономного обльоту вітрових турбін розвідувальним БПЛА	9
1.3 Висновки до першого розділу	15
2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ З ОДНИМ БПЛА ДЛЯ ОБЬОТУ ОБ'ЄКТІВ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ З GPS НАВІГАЦІЄЮ	17
2.1 Визначення апаратних і програмних підсистем програмно-технічного засобу	17
2.2 Програмне забезпечення та інтеграція	41
2.3 Висновок до другого розділу	42
3 ПРОГРАМНО-АПАРАТИЙ ПРОТОТИП КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ З ОДНИМ БПЛА ДЛЯ ОБЬОТУ ОБ'ЄКТІВ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ З GPS НАВІГАЦІЄЮ	44
3.1 Реалізація модулів польоту і збору геоданих БПЛА	44
3.2 Принципова електрична схема та алгоритм роботи дрона	58
3.3. Висновки до третього розділу	65
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	69

				КвРКІ.022026.22.02.02 ПЗ				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією.	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Ростислав МИХА				у		2
Перевір.		Олег САВЕНКО			Пояснювальна записка	ХНУ КІ2С-22-2		
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		2022.02.02				
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		2022.02.02				

ДОДАТОК А.....	74
ДОДАТОК Б.....	75
ДОДАТОК В.....	76

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

ВСТУП

Актуальність дослідження. Кіберфізичні системи дедалі активніше впроваджуються в критично важливі галузі, зокрема в енергетику, охорону довкілля та інфраструктурний моніторинг. Одним із перспективних напрямів є застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як адаптивних сенсорних елементів у системах технічного нагляду. Зокрема, в контексті обслуговування вітрових турбін, які часто розташовані у важкодоступних та вітряних регіонах, використання БПЛА значно підвищує ефективність та безпеку інспекцій, мінімізуючи людські ризики й витрати.

У сучасних умовах розвитку відновлюваної енергетики виникає потреба у створенні надійних, автоматизованих засобів обстеження об'єктів вітроенергетики. Це вимагає впровадження гнучких кіберфізичних систем, здатних до автономного збору, передачі та обробки даних за допомогою спеціалізованих апаратно-програмних платформ БПЛА.

Метою дипломної роботи є визначення умов та особливостей застосування обладнання БПЛА, а також оцінка механізмів обробки інформації у кіберфізичній системі адаптивного застосування моніторингових елементів розвідувального БПЛА для забезпечення достатньої ефективності виявлення об'єктів.

Об'єктом дослідження є функціонування моніторингових елементів розвідувального БПЛА.

Предметом дослідження є оцінка режимів застосування моніторингових елементів розвідувального БПЛА в умовах інспекції вітрових турбін.

					КвРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА АДАПТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МОНІТОРИНГОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗВІДУВАЛЬНОГО БПЛА ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ЩОДО ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ

1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей кіберфізичної системи інспекції вітрових турбін з використанням безпілотного літального апарата

Розташування численних вітрових турбін на великій території ускладнює їхній ручний огляд; безпілотні літальні апарати (дрони) здатні ефективно охопити такі віддалені об'єкти [3, 31].

Регулярний огляд і технічний моніторинг вітрових турбін є критично важливими для підтримання їх ефективності та надійності. Традиційні методи інспекції (підймання техніків на висоту по канатах, використання підйомних кранів чи телескопічних систем) пов'язані з високими витратами часу і грошей, а також із небезпекою для персоналу [4, 16]. Наприклад, під час огляду лопатей методом промислового альпінізму турбіну часто доводиться зупиняти на 12–18 годин, що призводить до значних простоїв і втрат у виробництві електроенергії [16, 32]. Крім того, такий огляд на висоті становить підвищений ризик для життя та здоров'я інспекторів. Застосування дронів дозволяє суттєво мінімізувати ці проблеми: БПЛА можуть швидко і безпечно обстежувати турбіни без тривалого відключення генерації [1, 5] Крім того, застосування БПЛА дозволяє отримувати високоякісні та деталізовані зображення, що забезпечує точніше виявлення потенційних дефектів на ранніх стадіях їх розвитку. Завдяки цьому обслуговування турбін стає більш прогнозованим, що дає змогу ефективніше планувати ремонтні роботи та оптимізувати витрати на технічне обслуговування. Також можливість регулярного обльоту значної кількості турбін за короткий проміжок часу відкриває перспективи для масштабних інспекційних кампаній та автоматизації процесів аналізу отриманих даних. У підсумку, використання дронів суттєво підвищує

					КвРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

загальну продуктивність і безпеку експлуатації вітрових електростанцій, роблячи галузь більш конкурентоспроможною.



Рисунок 1.1 – Вітрові турбіни [51].

Безпілотні квадрокоптери, оснащені сучасними сенсорами та камерами, здатні виконувати автономні польоти навколо веж турбін і збирати детальні дані про стан лопатей і обладнання [3, 7]. Це забезпечує більш частий та регулярний моніторинг: згідно з дослідженнями, впровадження дронів дає змогу збільшити кількість інспекцій з 2 до 8 на день та скоротити простой турбін приблизно на 75%, пропорційно зменшуючи втрати виробітку енергії [4, 33]. Одночасно знижується і вартість обстежень, адже відпадає потреба у дорогому обладнанні (кранах, помостах) та великій команді альпіністів [33]. До того ж дрони можуть отримувати зображення надвисокої роздільної здатності (аж до ~1 пікселя на мм), що дозволяє виявляти навіть дрібні тріщини чи дефекти на лопатях [3, 32]. Таким чином, актуальність використання БПЛА в сфері вітроенергетики обумовлена потребою підвищити безпеку, економічність та ефективність оглядів турбін [1, 8].

Моніторинг вітрових турбін за допомогою квадрокоптера висуває низку специфічних вимог до системи і пов'язаний з вирішенням кількох технічних завдань. Ключовими аспектами є точність навігації, автономність польоту, стабільність у повітрі та безпечність виконання місії [3, 8].

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимоги до точності огляду. Дрон повинен утримувати стабільний маршрут обльоту та позицію відносно турбіни з точністю до лічених метрів, а бажано – сантиметрів, особливо для отримання якісних знімків дефектів [4, 7]. Високоточна GPS-навігація або інші системи позиціонування необхідні, щоб квадрокоптер міг облітати турбіну по заданій траєкторії, не відхиляючись небезпечно близько до лопатей. Камера на борту має забезпечувати високу роздільність зображень, щоб можна було виявити дрібні тріщини, ерозію кромek чи інші пошкодження – для цього бажано досягти масштабу хоча б близько 1 мм на піксель на фото [3, 10].

Автономність та тривалість польоту. Оскільки вітрові турбіни часто розташовані на значній відстані одна від одної (наприклад, у полях чи на гірських хребтах, а також офшорні турбіни в морі), дрон має мати достатню дальність зв'язку і час автономного польоту [1, 6]. Обмежений запас батареї є типовою проблемою: квадрокоптери зазвичай можуть перебувати в повітрі 20–40 хвилин, що вимагає оптимізації маршруту і, можливо, проміжних посадок для заміни батарей при інспекції великого парку турбін [33]. Навіть при використанні одного БПЛА для однієї турбіни, бажано, щоб він встиг повністю облетіти всі лопаті та повернутися на базу до вичерпання заряду акумулятора. Це ставить завдання ефективного енергоменеджменту і автономності – дрон повинен самостійно виконувати політ за маршрутом без постійного ручного управління, використовуючи автопілот [3, 35].

Стабільність польоту і вплив середовища. Вітрові електроустановки, як зрозуміло з назви, розташовані у вітряних місцевостях. Пориви вітру та турбулентність навколо турбіни (особливо від обертання лопатей) можуть значно ускладнювати стабільний політ дрона [3, 6, 7]. Квадрокоптер повинен мати надійну систему стабілізації, щоб протистояти поривам вітру і підтримувати потрібну позицію та орієнтацію [5, 6]. Легкі дрони дуже чутливі до зміни погодних умов, сильного вітру, дощу тощо. Тому важливо, щоб система керування польотом враховувала показники з акселерометрів, гіроскопів, компасів та, за можливості, барометричних датчиків для утримання висоти і позиції навіть в умовах

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поривчастого вітру [3, 6]. Турбулентність від лопатей також може створювати непередбачувані повітряні потоки, які необхідно відфільтрувати системою стабілізації.

Безпека та надійність. Дрон, що виконує обліт турбіни, має працювати так, щоб уникнути зіткнень як з самою конструкцією (вежа, лопаті), так і з несподіваними перешкодами (птахи, інші дрони) [6, 8]. Безпека передбачає наявність резервних режимів (автовозврат на базу при втраті сигналу чи низькому заряді батареї) та виконання польоту на достатній відстані від лопатей [3, 35]. Окреме питання регулювання: у багатьох країнах польоти дронів потребують дозволів авіаційної влади, особливо на висотах, де розташовані верхівки турбін (~100 м і вище) [33, 37]. Тож система повинна відповідати нормам і мати передбачені заходи безпеки (геозони, «failsafe»-функції). Надійність системи GPS також критично важлива: в разі слабкого сигналу або помилок позиціонування необхідні механізми пом'якшення (наприклад, інерціальна навігація як резерв) [5, 6].

Обробка даних та виявлення пошкоджень. Хоча основна увага в цьому розділі апаратній і навігаційній частині системи, варто згадати, що кінцева мета обльоту – отримання якісних даних (фото, відео, сенсорних показників) для аналізу стану вітротурбіни [9, 10]. Це означає, що система повинна або у реальному часі, або після польоту передати ці дані для обробки. У сучасних системах інспекції часто застосовують алгоритми комп'ютерного зору та машинного навчання для автоматичного виявлення тріщин чи дефектів на зображеннях [11, 32]. Наприклад, система BladeView дозволяє автоматично аналізувати знімки лопатей та фіксувати поверхневі аномалії [8]. Це виходить за межі даного розділу, але впливає на вимоги до стабільності зйомки: кадри мають бути стандартизовані, зняті з однакових ракурсів для різних турбін, що вимагає автономного повторюваного маршруту обльоту [4, 10].

Отже, основні проблеми при застосуванні БПЛА для моніторингу турбін – це забезпечення високої точності польоту і зйомки, достатньої автономності та часу

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи, стабільності в умовах вітру, а також дотримання вимог безпеки [1, 33]. Незважаючи на ці виклики, правильно спроектована система може значно покращити ефективність обслуговування вітроенергетичних об'єктів. Згідно з оглядом літератури, все ще існує розрив у стандартизації підходів та подоланні окремих технічних бар'єрів (наприклад, щодо впливу вітру, обмежень вантажопідйомності дрона чи тривалості роботи батарей) [11, 31].

1.2 Аналіз алгоритмічних і апаратно-програмних засобів керування кіберфізичною системою автономного обльоту вітрових турбін розвідувальним БПЛА

Для керування польотом квадрокоптера традиційно використовуються PID-регулятори (пропорційно-інтегрально-диференціальні) в каскадній архітектурі [3, 5]. Також, як згадувалося, застосовуються Калманівські фільтри для оцінки стану [2, 5].

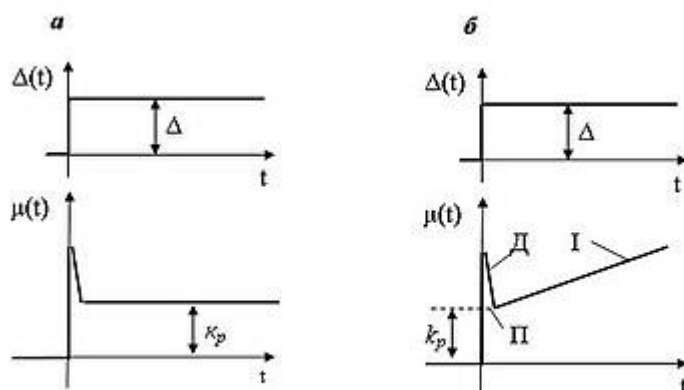


Рисунок 1.2 – Перехідна функція: (а) – ПД та (б) – ПІД-регулятора[20].

Сучасні безпілотні літальні апарати, зокрема мультикоптери, керуються за допомогою каскадної структури регуляторів, яка забезпечує поділ управління на кілька рівнів. В основі такої архітектури лежить принцип ієрархії: внутрішні

контури забезпечують стабілізацію на низькому рівні, тоді як зовнішні відповідають за навігацію та траєкторне керування.

Внутрішній контур функціонує з високою частотою (приблизно 200–500 Гц) і відповідає за стабілізацію кутових швидкостей та орієнтації дрона в просторі. Саме цей рівень регулювання взаємодіє з виконавчими механізмами, зокрема електромоторами. Зовнішній контур, у свою чергу, працює з нижчою частотою (зазвичай 5–10 Гц) і формує завдання для внутрішнього регулятора. Наприклад, у разі потреби змінити положення дрона в просторі, зовнішній контур розраховує необхідний нахил (скажімо, 5° уперед) і передає відповідне завдання на внутрішній регулятор тангажу, який виконує фізичну реалізацію цієї команди [5, 6].

Для забезпечення точного контролю кожної з осей (крену, тангажу) зазвичай використовуються подвійні PID-регулятори. Один з них контролює сам кут визначає різницю між бажаним і поточним значенням, тоді як другий регулює кутову швидкість, формуючи необхідну тягу для її досягнення. Така конфігурація, що передбачає взаємодію angle PID та rate PID, забезпечує швидку реакцію без перерегулювання й осциляцій. Зокрема, пропорційний регулятор по куту задає напрямок дії, а PID по гіроскопу точно гасить надлишкову динаміку.

Управління висотою дрона організоване за аналогічною схемою. Сигнал про висоту надходить від барометра, а вертикальна швидкість оцінюється або за допомогою похідної від барометричних показників, або на основі даних з акселерометра, оброблених фільтрами. PID-регулятор по висоті впливає на колективну тягу – тобто змінює швидкість обертання усіх гвинтів одночасно. При цьому враховуються маса дрона і тягові характеристики гвинтів, щоб уникнути нерівномірного підскокування чи «просідання» під час маневрів [5, 6].

Для горизонтального переміщення апарата застосовуються навігаційні регулятори, які, виходячи з позиційної помилки (наприклад, відхилення від траєкторії), формують бажану швидкість або нахил. Такі системи зазвичай реалізуються у вигляді PID-контролерів по положенню, що генерують потрібні прискорення для подальшої реалізації у вигляді орієнтації корпусу дрона [5].

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Забезпечити надійність і точність керування дозволяє Калманівський фільтр, що виконує функцію оцінювача стану (state estimator). Цей фільтр поєднує математичну модель руху дрона з показами датчиків, згладжуючи шуми та компенсуючи тимчасові збої. Наприклад, короточасне спотворення координат від GPS не викличе різких змін у керуванні, оскільки ЕКФ (Extended Kalman Filter) розпізнає це як недостовірну аномалію і не врахує її у розрахунках. Окрім того, фільтр дозволяє інтегрувати дані акселерометрів для підвищення точності визначення швидкості, що особливо корисно при відсутності частого оновлення з боку GPS. В рамках розробки доцільним є використання готових реалізацій ЕКФ із відкритих проєктів, таких як ArduPilot або PX4, з урахуванням конфігурації встановлених сенсорів [6, 7].

Належна робота регуляторів значною мірою залежить від правильного налаштування їхніх PID-параметрів. Невдало підібрані коефіцієнти можуть призвести до осциляцій, нестабільної поведінки або надмірної інерційності. Тому процес налаштування зазвичай включає послідовне тестування: спочатку внутрішніх контурів стабілізації, а потім зовнішніх – у польових умовах. Існують методики автоматичного налаштування, зокрема Ziegler-Nichols, а також функції autotune у низці автопілотів, що можуть суттєво полегшити цей процес [5, 6]. Незважаючи на наявність адаптивних та робастних підходів, класичний PID зберігає популярність завдяки простоті й передбачуваності результатів [6, 31].

Особливу увагу також слід приділити алгоритмам fail-safe, які активуються у разі виникнення аварійних ситуацій. До таких сценаріїв належать втрата зв'язку з пультом або телеметрією, критичне зниження напруги акумулятора тощо. У цих випадках автопілот автоматично переходить у безпечний режим – наприклад, повернення до точки зльоту (Return-to-Launch) або зависання у повітрі з подальшим очікуванням. Такі механізми реалізовані з найвищим пріоритетом, оскільки відповідають за загальну безпеку польотів [5, 35].

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, реалізація польотного контролю квадрокоптера в нашій системі базується на перевірених підходах: каскадних PID-регуляторів для стабілізації і руху, доповнених фільтрацією даних сенсорів (ЕКФ). Це забезпечить надійне керування дроном під час обльоту вітрової турбіни, навіть за наявності збурень чи часткової недоступності сигналів [6, 7]

Для реалізації системи моніторингу вітрових турбін за допомогою БПЛА доцільно обрати апаратно-програмну платформу, яка поєднує достатню обчислювальну потужність, наявність необхідних інтерфейсів для сенсорів та модулів зв'язку, а також сумісність із сучасними бібліотеками автопілоту [2, 5]. Найбільш придатними варіантами є мікрокомп'ютери типу Raspberry Pi або плати управління типу Pixhawk, які підтримують відкриті системи автопілоту, такі як ArduPilot або PX4 [6, 36].



Рисунок 1.2 – Pixhawk – польотний контролер.[21]

У сучасних безпілотних системах для виконання завдань моніторингу, зокрема інспекції вітрових турбін, важливим є чітке розмежування обов'язків між бортовими комп'ютерами та контролерами польоту. Оптимальною конфігурацією є використання компаньйон-комп'ютера Raspberry Pi 4 у поєднанні з польотним

контролером Pixhawk. Такий підхід дозволяє розділити завдання низькорівневого керування польотом і високорівневої обробки даних. Зокрема, Raspberry Pi 4 виступає в ролі обчислювального вузла, який відповідає за логіку автономної поведінки дрона, прийняття рішень, запуск алгоритмів комп'ютерного зору, аналіз відеопотоку, розпізнавання об'єктів, комунікацію з наземною станцією, а також реалізацію сценаріїв машинного навчання для виявлення дефектів лопатей та інших структурних елементів турбіни [3,24]. У свою чергу, Pixhawk забезпечує керування двигунами, стабілізацію положення дрона у просторі та виконання базових алгоритмів контролю за допомогою PID-регуляторів і фільтрів оцінки стану, таких як EKF. Контролер приймає дані з основних сенсорів – IMU, GPS, компаса, барометра, лазерного дальноміра і видає низькорівневі команди управління [6, 7].

Для розробки програмної логіки автономного керування доцільним є використання мови програмування Python, яка має широку підтримку у сфері робототехніки, численні бібліотеки та фреймворки для роботи з зображеннями, даними телеметрії, а також обміном даними по MAVLink-протоколу. У випадках використання менш потужного обладнання або необхідності більшої енергоефективності можливим є перехід на MicroPython. Однак найбільш гнучким середовищем для реалізації складної автономної поведінки вважається Robot Operating System (ROS) – інфраструктура, яка дозволяє організувати міжпроцесну взаємодію, обробку сенсорної інформації в реальному часі, запуск алгоритмів планування траєкторії та інтеграцію з PX4 або ArduPilot через MAVROS [5, 36]. Використання ROS відкриває широкі можливості для адаптації системи до змінних умов місії, а також для модульного розширення функціональності за рахунок наявних відкритих пакетів.

Значне поширення у бортових системах дронів отримали алгоритми глибокого навчання, які особливо ефективні для обробки візуальної інформації. Найбільш популярним підходом є використання Convolutional Neural Networks (CNN) – згорткових нейронних мереж, які дозволяють автоматично виявляти

дефекти поверхні, такі як тріщини, ерозія кромки, деламінування тощо. Згідно з результатами досліджень, CNN-моделі демонструють високу точність класифікації пошкоджень, досягаючи понад 90% точності при аналізі зображень лопатей[3, 10]. Застосування CNN дозволяє мінімізувати втручання людини на етапі первинної діагностики та значно пришвидшити процес аналізу. У деяких промислових рішеннях ці моделі працюють безпосередньо на борту дрона завдяки достатній обчислювальній потужності компаньйон-комп'ютера алгоритми запускаються в режимі реального часу під час польоту. Це дозволяє вже під час обльоту визначати критичні ділянки на поверхні турбіни та передавати найважливішу інформацію оператору в режимі онлайн [8, 11].

Оскільки інспекційна місія передбачає збір великої кількості візуальних і телеметричних даних, важливо передбачити надійний механізм збереження та передачі інформації. Найбільш поширені підходи – це зберігання даних на бортовій пам'яті (SD-карта, SSD) з подальшим зчитуванням після завершення польоту або ж бездротова передача через канали Wi-Fi, 4G або 5G у режимі реального часу [5, 38]. У другому випадку особливу увагу слід приділити якості каналу зв'язку, затримкам та втратам пакету, особливо при трансляції відео. У випадках великої кількості об'єктів для огляду доцільно впровадити планувальник маршрутів, який автоматично розподіляє місії дрона з урахуванням заряду акумулятора, погодних умов, пріоритетності турбін та відстані до бази. Такі системи дозволяють ефективно керувати ресурсами та мінімізувати простой. Їх реалізація вже продемонстрована у низці відкритих і комерційних проєктів [35, 38].

Окрім звичних, вже відпрацьованих підходів до інспекції вітрових електростанцій, на сьогодні з'являється все більше нових, інноваційних рішень, які суттєво розширюють можливості моніторингу й обслуговування обладнання. Наприклад, дослідники та розробники активно вивчають використання дронів, обладнаних рентгенівськими камерами, для детального аналізу внутрішньої структури лопатей вітрогенераторів. Це дає змогу виявляти приховані дефекти чи ознаки зношення матеріалу, які неможливо побачити неозброєним оком чи навіть

за допомогою звичайних оптичних камер [35]. Таким чином, власники та обслуговуючі компанії можуть оперативніше реагувати на потенційні проблеми, ще до того, як вони переростуть у серйозні пошкодження.

Ще одним сучасним напрямом є застосування підводних безпілотних апаратів (ROV - remotely operated vehicle), які призначені для роботи під водою. Вони надзвичайно корисні при інспекції офшорних (тобто розташованих у морі) вітрових електростанцій. Саме такі дрони дозволяють якісно досліджувати стан фундаментів і нижніх частин опорних конструкцій веж, що занурені під воду й недоступні для візуального огляду звичайними засобами. За допомогою високоякісних камер, сенсорів глибини, ультразвукових сканерів та інших спеціалізованих пристроїв, підводні дрони здатні оперативно й безпечно збирати інформацію про стан конструкцій, наявність корозії, обростання біологічними організмами або інші пошкодження [36].

Поєднання різних типів безпілотних технологій відкриває нові горизонти для гібридного моніторингу: коли наземні, повітряні та підводні дрони працюють разом, вони дозволяють отримати максимально повну та об'єктивну картину стану вітроенергетичних об'єктів. Це, в свою чергу, значно знижує потребу в участі людей у небезпечних або важкодоступних місцях, прискорює процес огляду, підвищує рівень безпеки працівників та економить ресурси. В цілому, сучасний підхід до інспекції за допомогою таких інноваційних платформ стає потужним інструментом для ефективного обслуговування й довготривалої експлуатації вітрових електростанцій.

1.3 Висновки до першого розділу

У даному розділі проаналізовано структурні та функціональні особливості кіберфізичної системи моніторингу вітрових турбін з використанням розвідувального безпілотного літального апарата (БПЛА). Доведено доцільність застосування дронів для інспекції вітрових електроустановок завдяки їх здатності

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суттєво зменшувати простої, підвищувати безпеку обслуговування та забезпечувати високу точність виявлення дефектів.

Окреслено ключові технічні вимоги до БПЛА: точне позиціонування, стабільність польоту у вітряних умовах, тривалість автономної роботи, а також реалізацію fail-safe алгоритмів. Розглянуто використання каскадних PID-регуляторів та фільтра Калмана (ЕКФ) як надійних засобів керування польотом і стабілізації квадрокоптера.

Визначено доцільність побудови системи на основі відкритих апаратно-програмних рішень, зокрема плат Pi4hawk і Raspberry Pi, що дозволяє реалізувати адаптивну логіку обльоту та обробку даних у реальному часі. Розглянуто використання алгоритмів комп'ютерного зору й нейромереж для автоматичного виявлення дефектів, а також важливість збереження та передачі даних інспекції.

Таким чином, сформульовано вимоги до апаратної, програмної та алгоритмічної частин системи та закладено основу для реалізації ефективної адаптивної кіберфізичної системи моніторингу вітрових турбін із використанням БПЛА.

					КвРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ З ОДНИМ БПЛА ДЛЯ ОБ'ЇОТУ ОБ'ЄКТІВ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ З GPS НАВІГАЦІЄЮ

2.1 Визначення апаратних і програмних підсистем програмно-технічного засобу

Контролер польоту – це центральний модуль дрона, що відповідає за стабілізацію та автопілот. Оптимальними для відкритих систем ArduPilot/PX4 є контролери сімейства Pixhawk та сумісні плати на базі STM32. Вони забезпечують хороший баланс ціни і продуктивності, мають відкриту архітектуру і підтримують широкий набір датчиків. Сучасні версії, як-от Holybro Pixhawk 6X, оснащені швидким 32-бітним H7 процесором (480 МГц), мають декілька інерційних датчиків (IMU) з віброізоляцією та резервуванням, подвоєні барометри, а також вбудований Ethernet-порт для високошвидкісного з'єднання з комп'ютером 1 . Такі контролери повністю сумісні з прошивками ArduPilot та PX4 і розраховані на універсальне застосування – від мультикоптерів до літаків.

Одним із найпопулярніших рішень є Pixhawk 4 (та новіші 5, 6 серії) – відкритий автопілот, розроблений для спільнот PX4/ArduPilot. Він підтримує всі необхідні інтерфейси (UART, I²C, SPI, CAN) для підключення GPS, компасу, далекомірів, телеметрії тощо. Існують доступні за ціною клони Pixhawk (наприклад, Pixhawk 2.4.8), проте вони базуються на старіших процесорах і сенсорах. Сучасні моделі Pixhawk від Holybro, mRo, CUAV та ін. пропонують оновлені датчики і більшу обчислювальну потужність. Наприклад, Pixhawk 6C позиціюється як «cost-effective» (відносно недорогий) автопілот із резервованими IMU та сучасним Cortex-M7 CPU 2 3 . У більшості випадків Pixhawk є оптимальним вибором для бюджетної платформи БПЛА: його ціни коливаються в межах \\$100–200 (без урахування навісного обладнання), що виправдано його функціональністю.

Для більш вимогливих застосувань використовується The Cube – модульний автопілот другого покоління Pixhawk. Найвідомішим є Cube Orange, який містить

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужний процесор H7 і потрійну резервну IMU з термостабілізацією, а також інтегрований приймач ADS-B для виявлення пілотованих літаків 4 . Cube Orange (нащадок Pixhawk 2.1 «Cube Black») розроблений з акцентом на надійність і безпеку: він має ударостійкий монтаж IMU, подвійні живлення та інші захисні функції. Такий контролер повністю підтримує ArduPilot/PX4 та здатен керувати навіть великими промисловими дронами. Вартість Cube Orange вища – орієнтовно \$300–500 за комплект з базовою платою (carrier board) , тому його доцільно брати, якщо потрібна максимальна надійність і резервування сенсорів[5,4]. У контексті моніторингу вітротурбін Cube Orange привабливий тим, що забезпечує стабільний політ у вітряних умовах завдяки якісним датчикам і резервуванню, але для бюджетних проєктів можна обрати простіший контролер.

Альтернативою Pixhawk можуть бути недорогі плати від спільноти DIY, зокрема контролери Matek. Наприклад, плати Matek H743-Wing (на STM32H743) відзначають як одні з найвигідніших за співвідношенням ціна/функціонал [6]. Вони підтримують прошивки ArduPilot, мають достатню кількість портів, але зазвичай оснащені тільки одним IMU без резервування. Такий контролер може коштувати <\$100, що підходить для обмежених бюджетів або навчальних проєктів. Втім, він більше орієнтований на дрібні платформи та вимагатиме більш уважного налаштування фільтрів, оскільки не має апаратної віброізоляції чи трьох IMU як дорогі Pixhawk.

Також варто згадати інтегровані рішення на основі Linux. Одне з них – плата Navio2 (від Emlid), яка встановлюється як shield на Raspberry Pi і перетворює його на контролер БПЛА з ArduPilot. В цьому випадку сама Raspberry Pi виконує всі обчислення автопілота і паралельно може працювати як компаньйон-комп'ютер. Перевагою є мінімум окремих компонентів і можливість використання потужності Linux, однак недоліком – підвищене навантаження на процесор і потенційно менша надійність (бо немає окремого RTOS-контролера для критичних задач). Подібним шляхом пішли деякі сучасні платформи: наприклад, ModalAI VOXL 2 об'єднує польотний контролер і комп'ютер на базі Qualcomm в одному блоці. Але такі

інтегровані системи зазвичай коштують значно дорожче і виходять за рамки недорогих рішень.

Висновок по контролерах: Для бюджетного дрона інспекції турбін оптимальним вибором буде сучасний Pixhawk або його еквівалент. Він забезпечує сумісність з відкритим ПЗ, має достатню продуктивність і підтримує всі необхідні сенсори та модулі. Якщо бюджет дуже обмежений – можна розглянути плату Matek (або інші контролери на H7/F7), розуміючи компроміси у вигляді відсутності резервування IMU. Якщо ж потрібна максимальна надійність, доцільно інвестувати в Cube Orange або подібний автопілот з трьома IMU і розширеними можливостями безпеки.

Компаньйон-комп'ютер – це додатковий бортовий комп'ютер (часто під управлінням Linux), що працює в парі з контролером польоту. Він не є обов'язковим для базового польоту, але відкриває великі можливості: виконання алгоритмів комп'ютерного бачення, збір та попередня обробка даних, високорівневе управління місією, зв'язок з хмарою тощо 7 8 . Для задач моніторингу вітрових турбін компаньйон-комп'ютер корисний тим, що може в реальному часі аналізувати відеопотік з камери (виявляти тріщини на лопатях, тощо) або будувати 3D-модель турбіни, тоді як контролер польоту займається стабілізацією і навігацією.

Найпопулярнішими компаньйон-комп'ютерами є компактні одноплатні комп'ютери (SBC). Лідером за поширенням є Raspberry Pi 4 (або Compute Module 4), який має 4-ядерний процесор ~1.5 ГГц, 2–8 ГБ ОЗП і достатню продуктивність для запуску ROS, OpenCV та подібних задач. Raspberry Pi вирізняється дуже доступною ціною і великою спільнотою підтримки; він здатний виконувати скрипти аналізу зображень, спілкуватися з автопілотом через MAVLink-протокол і навіть стримити відео по Wi-Fi. Проте його обчислювальної потужності може бракувати для важких нейромережевих алгоритмів – у таких випадках однокристальний комп'ютер NVIDIA Jetson є кращим вибором.

NVIDIA Jetson Nano – приклад недорогого (\\$100–150) компаньйон-комп'ютера з GPU для AIзадач. Він оснащений 128-ядерним графічним процесором NVIDIA і дозволяє виконувати прискорений інференс нейронних мереж (наприклад, розпізнавання пошкоджень на зображенні) прямо на дроні. Jetson Nano має 4-ядерний CPU ~1.4 ГГц, 4 ГБ ОЗП, працює під Linux (Ubuntu) і підтримує всю екосистему NVIDIA CUDA та TensorRT. Це робить можливим реалізацію «розумного» дрона, який сам аналізує відео з камери в польоті. Недоліком Jetson Nano є дещо вищі вимоги до живлення (до 10 Вт споживання) і вага, але для середнього дрона це прийнятно. Для складніших завдань можуть застосовуватися Jetson TX2, Xavier NX, Orin – вони забезпечують ще більшу продуктивність (GPU з кількома сотнями ядер, десятки TOPS AI-продуктивності), але їхня ціна вже вимірюється сотнями доларів, а споживання – десятками ват. В контексті недорогих рішень Jetson Nano лишається оптимальним компромісом, тоді як більш потужні Jetson варто брати хіба що під дуже специфічні проєкти з щільним бюджетом.

Інші варіанти компаньйон-комп'ютерів включають Odroid, BeagleBone AI, Intel NUC/UP Board та подібні SBC. Ключовими критеріями вибору є: сумісність з Linux, достатня продуктивність CPU/ GPU, наявність потрібних портів (UART або USB для зв'язку з автопілотом, CSI або USB для камер, Wi-Fi/Ethernet для зв'язку) та енергоспоживання, сумісне з бортовою батареєю. Варто врахувати фізичні розміри і вагу – комп'ютер повинен компактно розміститися на платформі дрона.

Спеціально для інтеграції Pixhawk з комп'ютерами з'явилися комбіновані плати. Наприклад, Holybro випустила базові плати, що поєднують автопілот і посадочне місце під комп'ютер: Pixhawk RPi CM4 Baseboard (під модуль Raspberry Pi CM4) та Pixhawk Jetson Baseboard (під модуль NVIDIA Jetson Orin Nano/NX) 9 . Вони відповідають стандарту Pixhawk Autopilot Bus і дозволяють просто вставити відповідний контролер і комп'ютер у єдиний блок 9 . Таке рішення економить місце і спрощує монтаж, проте поки що є новинкою і коштує дорожче, ніж окремі компоненти. Тим не менш, тренд інтеграції очевидний: виробники пропонують

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

готові «комп'ютеризовані» автопілоти (напр., Skynode від Auterion, ModalAI VOXL), які “з коробки” оснащені Linux-комп'ютером і датчиками. Для максимально бюджетного проєкту можна цього не застосовувати, а зібрати систему з окремих частин – це дещо підвищує складність інтеграції, зате дозволяє оптимізувати витрати.

Правильний вибір сенсорів визначає, наскільки точно дрон зможе орієнтуватися і виконувати інспекцію. Для моніторингу вітрових турбін потрібен набір сенсорів для навігації (положення, висота, відстань до об'єктів) і збору даних інспекції (високоякісні зображення або інші вимірювання стану лопатей).

У складі безпілотної платформи для інспекції вітрових турбін критично важливу роль відіграє правильно підібране сенсорне обладнання. Його завдання – забезпечити точне позиціонування, стабілізацію апарата в просторі, збір візуальної та просторової інформації, а також допомогу у запобіганні зіткненням з об'єктом інспекції.

Основа системи навігації становить GNSS-приймач, зазвичай з підтримкою кількох супутникових систем – GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou. Одним із найпоширеніших і доступних рішень є модулі на базі чипа Ublox NEO-M8N, які забезпечують точність близько 2–3 метрів і часто містять вбудований магнітометр. Більш сучасні модулі, зокрема Ublox M9N, мають ще вищу чутливість і можуть працювати на кількох частотах, що підвищує точність позиціонування. У середовищі вітропарку GNSS-приймач є основним засобом локалізації дрона. Для підвищення точності можна використати систему RTK-GPS, що базується на модулях типу Ublox M8P або F9P у поєднанні з наземною базовою станцією. Це дозволяє досягти сантиметрової точності, однак така система є складнішою в налаштуванні та значно дорожчою. У бюджетних рішеннях зазвичай достатньо стандартного GNSS, який, у разі збоїв, може бути доповнений візуальними або інерційними методами навігації.

Ключовим для стабілізації польоту є інерційний модуль (IMU), що об'єднує гіроскопи та акселерометри. Він зазвичай інтегрований у контролер польоту, як,

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наприклад, у Pixhawk, де реалізоване резервування шляхом встановлення двох або трьох IMU одночасно. Це дозволяє зберігати надійність навіть у випадку відмови одного з датчиків. У спрощених варіантах, наприклад на платах Matek, IMU може бути лише один, однак за умови якісного налаштування цього цілком достатньо. Для зменшення впливу вібрацій на точність показань IMU необхідно забезпечити віброізоляцію – використовується або ізолююча пінка, або демпфуюча платформа.

Магнітометр (компас) є ще одним критично важливим сенсором, який визначає курс дрона відносно магнітного північного полюса. У більшості випадків він встановлюється виносно – на тій самій платі, що й GPS, аби уникнути впливу електромагнітних завад від двигунів і силових кабелів. Його наявність забезпечує стабільне утримання орієнтації в просторі, особливо в режимі Loiter та при автономній навігації по заданих точках. Через присутність великих металевих мас у вітротурбінах перед початком роботи обов'язковим є калібрування компаса.

Для контролю висоти в системі використовується барометр, який оцінює зміну атмосферного тиску. Барометри зазвичай вбудовані в автопілот і іноді дублюються для підвищення надійності. Цей сенсор формує основу режиму стабілізації AltHold. Проте на нього можуть негативно впливати сонячне тепло або пориви вітру, тому на низьких висотах або поблизу конструкції доцільніше покладатися на альтернативні засоби вимірювання, зокрема далекоміри.

Стабільне утримання дрона на фіксованій відстані до об'єкта забезпечується лазерним дальноміром. Найпоширенішими є легкі й компактні лідари, зокрема LightWare SF11/C або модулі від Benewake, що здатні вимірювати відстань до 40–50 метрів із частотою оновлення в десятки разів на секунду. Вони легко підключаються до автопілота через UART або I²C. Рекомендується встановлювати далекоміри як у вертикальній орієнтації – для контролю висоти, так і горизонтально – для вимірювання дистанції до лопаті або стіни. У разі обмеженого бюджету лазерний далекомір залишається найкращим вибором, хоча у високобюджетних проектах можливе застосування повноцінних 3D-лідарів для побудови хмар точок, наприклад, Velodyne або Ouster.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Головним джерелом візуальної інформації виступає камера високої роздільної здатності. Вона дозволяє проводити фото – та відеофіксацію стану лопатей із точністю, необхідною для виявлення дрібних дефектів і тріщин. Для цього рекомендовано використовувати камери щонайменше 4К (8 МП) для відео або понад 20 МП для фотографій. У бюджетних рішеннях застосовуються екшн-камери типу GoPro, які забезпечують ширококутне зображення, але не мають можливості оптичного зуму. Більш ефективними є камери з підвісом і змінним фокусом – наприклад, Zenmuse Z30 або камери на основі сенсорів Sony. Для стабілізації та наведення камери в умовах вітру важливо використовувати 3-осьовий гімбал. Зображення з камери зазвичай передається в реальному часі на компаньйон-комп'ютер через USB або CSI для подальшого аналізу.

Окрім основних сенсорів, в окремих випадках застосовуються спеціалізовані системи, зокрема ультразвукові сканери для виявлення внутрішніх дефектів або тепловізори для виявлення перегріву лопатей. Такі компоненти є вартісними, важкими та складними в інтеграції, тому зазвичай встановлюються лише у високобюджетних платформах або автономних наземних системах. У межах економічного рішення використання подібних сенсорів не є пріоритетним, однак можливе у вигляді модульного розширення. Для широкого моніторингу за допомогою БПЛА зазвичай достатньо комбінації RGB-камери (візуальний огляд) і лідара (для вимірів і 3D-моделі). Ці сенсори відносно легкі і дозволяють оглянути лопаті як зблизька, так і з певної відстані. Термальна камера може стати в пригоді, якщо є завдання виявляти аномалії нагріву (наприклад, тертя у механізмах). Невеликі тепловізори (FLIR Lepton, Tau) можна підвісити разом з основною камерою; по вартості це додатково кілька сотень доларів, тому залежить від бюджету.

Підсумовуючи, мінімальний набір сенсорів для недорогої платформи моніторингу турбін такий: GPS (GNSS) модуль з компасом, барометр, IMU – усе це вже є в типовому автопілоті Pixhawk; HD-камера на стабілізованому підвісі; бажано лазерний далекомір середнього радіуса. Ці елементи забезпечать дрон необхідними

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

«відчуттями» для безпечного обльоту турбіни і збору якісних даних. За потреби система легко розширюється – наприклад, можна підключити другий GPS (для резерву чи RTK), додати зовнішній ADS-B приймач (щоб дрон чув літаки, якщо немає такого в контролері), чи оптичний сенсор потоку для утримання позиції поблизу структури без GPS. Вибір сенсорів залежить від вимог завдання і бюджету, але в цілому наведені компоненти є оптимальними за критерієм ціна – функціональність.

Для управління дроном та передачі зібраних даних на землю потрібні надійні канали зв'язку. Існує декілька класів комунікаційних модулів, які можуть бути встановлені на БПЛА:

Для забезпечення ефективної передачі даних між дроном та оператором існує кілька каналів зв'язку, кожен з яких має свої особливості та сценарії використання. Одним із найпоширеніших і водночас доступних способів є технологія Wi-Fi (802.11). Вона передбачає використання бездротового з'єднання на коротких відстанях і широко підтримується багатьма компаньйон-комп'ютерами, зокрема Raspberry Pi. У типовому сценарії дрон створює точку доступу, до якої оператор може під'єднатися за допомогою ноутбука або смартфона. Серед переваг Wi-Fi слід відзначити високу пропускну здатність, що дозволяє транслювати відео високої якості з мінімальною затримкою. Однак ефективна дальність дії залишається обмеженою – у відкритому просторі з хорошими антенами зв'язок зберігається лише на кількасот метрів. Для збільшення дальності іноді застосовують підсилювачі або спеціалізовані мости на базі обладнання типу Ubiquiti або MikroTik. Такі рішення можуть забезпечити зв'язок на кілька кілометрів, але потребують налаштування та додаткового живлення. Таким чином, Wi-Fi найбільше підходить для локальних інспекцій або передавання даних після завершення польоту.

Зі значно більшими можливостями щодо дальності виступає мобільний зв'язок через мережі 4G/5G (LTE). Його використання дозволяє здійснювати передачу телеметрії та відео практично без обмежень по відстані – за умови

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наявності покриття операторів. Спеціалізовані модулі, такі як CUAV LTE Link, забезпечують стабільну трансляцію відео з затримкою близько 250 мс при роздільній здатності 1080p. Це відкриває можливість централізованого керування дроном з пункту управління, навіть якщо сам апарат перебуває на віддаленому вітропарку. Мобільний модем виступає в ролі мікрокомп'ютера зі слотом для SIM-карти і водночас виконує функцію маршрутизатора: він підключається до автопілота (через UART) і компаньйона (через USB або Ethernet), а з іншого боку – з'єднується з наземним сервером або клієнтом типу Mission Planner через інтернет. Водночас такий канал зв'язку має обмеження: у місцевостях без мобільного покриття його використання стає неможливим. Крім того, слід враховувати вартість устаткування і потребу в оплаті мобільного зв'язку. В якості альтернативи спеціалізованим модулям часто використовують звичайні 4G-роутери з налаштованим VPN-з'єднанням – це дешевше, хоча й вимагає більше зусиль для інтеграції.

Більш традиційним способом комунікації залишається радіотелеметрія на частотах 433 або 915 МГц, яка реалізується за допомогою комплектних радіомодемів. Такі пристрої дозволяють утворювати двосторонній канал обміну даними між дроном і наземною станцією на відстанях до кількох кілометрів, залежно від антен, висоти встановлення та умов місцевості. Цей канал є достатнім для обміну телеметрією у форматі MAVLink, який передбачає передачу координат, стану систем та команд управління зі швидкістю близько 57–115 кбіт/с. Простота у використанні – ще одна перевага: модулі, як правило, постачаються вже налаштованими, і їх достатньо просто підключити до відповідних портів. Водночас через низьку пропускну здатність вони не придатні для передавання відео або великих обсягів даних. Однак у сценаріях технічного огляду вітрових турбін це не є критичним – можна вести телеметрію через радіоканал, а відео зберігати на бортову пам'ять дрона з подальшим перенесенням після посадки.

Іншим цікавим рішенням є технологія LoRa (Long Range Radio), яка забезпечує значну дальність зв'язку при мінімальному енергоспоживанні. За

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допомогою LoRa можливо підтримувати обмін на десятки кілометрів, навіть у відсутності інтернету чи традиційних радіоканалів. Це досягається завдяки використанню вузькополосної модуляції, яка, однак, суттєво обмежує пропускну здатність: канал підходить лише для передавання простих команд і базової телеметрії. Відеопотік або великі дані через LoRa передавати неможливо. Тому її найчастіше застосовують як резервний засіб зв'язку, або ж у спеціалізованих сценаріях з мінімальними вимогами до обсягу переданих даних. У деяких випадках модулі для Pixhawk можуть працювати в режимі LoRa, що дозволяє адаптувати систему до конкретних вимог місії.

Окрему категорію становлять спеціалізовані цифрові відеолінки, такі як DJI OcuSync, SIYI або Herelink. Ці системи поєднують функції стабільного радіокерування та передачі відеосигналу у високій якості (зазвичай HD або Full HD) на великі відстані – до 10 км і більше в ідеальних умовах. Вони забезпечують низьку затримку, високу стабільність каналу та зручну інтеграцію з комерційними платформами. Такі рішення активно використовуються у сфері професійної аерозйомки, інспекцій критичної інфраструктури, а також у військових або напіввійськових системах розвідки.

Однак незважаючи на ефективність, подібні відеолінки функціонують на основі закритих протоколів і є частиною закритих екосистем, що значно обмежує можливості для адаптації, розширення або налаштування під конкретні цілі. Крім того, їхня вартість може в кілька разів перевищувати бюджет доступних платформ з відкритим ПЗ та обладнанням. Тому в межах проєкту, що спрямований на побудову гнучкої, масштабованої та кастомізованої кіберфізичної системи розвідувального БПЛА, такі відеолінки розглядаються переважно як додатковий варіант – зокрема у випадках, коли відповідне обладнання вже є в наявності або інтеграція з комерційною платформою виправдана з точки зору конкретного застосування.

Нижче наведено таблицю, що підсумовує характеристики основних варіантів зв'язку:

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Характеристики основних варіантів зв'язку

Тип зв'язку	Дальність	Швидкість	Примітки
Wi-Fi (2.4/5 ГГц)	ГГц) ~0.1–0.5 км (лінія бачення)	Дуже висока (десятки Мбіт)	Пряма передача відео на малих відстанях; залежить від перешкод, потрібна пряма видимість
4G/5G LTE	Практично необмежена (де є покриття)	Висока (до десятків Мбіт)	Передача через інтернет; 1080p відео ~250 мс затримка. Необхідна SIM, витрати на інтернет; дальність необмежена за наявності мережі
Телеметрія 915 МГц	~1–5 км (залежно від антен)	Низька (~50–100 кбіт/с)	Класичний MAVLink-канал для управління і даних. Простий у використанні, не підходить для відео.
LoRa модеми	10+ км (дуже далека відстань)	Дуже низька (кілобайти/с)	Підходить лише для команд і телеметрії. Дуже енергоефективний, стійкий канал, але відео не передає.

Як видно з таблиці, для відеотрансляції оптимальні або Wi-Fi, або 4G. Для управління і телеметрії – радіомодеми 433/915 МГц або LoRa. На практиці часто комбінують: наприклад, ставлять 4G-модем для основного каналу (і передають ним все, включно з відео), а простий 915 МГц радіомодем – як резервний канал керування на випадок втрати інтернету. Або навпаки: основний канал керування

через радіомодем, а відео записується на борту і періодично передається по Wi-Fi при наближенні. Баланс вартість/ефективність тут такий: найдешевше – стандартний радіомодем (десятки доларів), Wi-Fi – теж дешево (фактично безкоштовно, якщо є модуль), LoRa – помірно (може потребувати додаткового налаштування), 4G – найдорожче (потрібні спецмодулі або рішення через смартфон/роутер). Вибір залежить від сценарію: якщо оператор завжди поруч (на кожній турбіні) – вистачить Wi-Fi або радіомодем; якщо треба дистанційно контролювати дрон на всьому вітропарку – 4G дуже виручить.

Використання відкритого програмного забезпечення є одним із ключових чинників, що дозволяє значно розширити функціональні можливості безпілотної платформи без значного збільшення вартості. Задіяна при цьому обчислювальна потужність компаньйон-комп'ютера (наприклад, Raspberry Pi або NVIDIA Jetson) відкриває шлях до реалізації складних алгоритмів навігації, комп'ютерного зору та автономного планування місій. Два основні підходи до програмної реалізації полягають у використанні Robot Operating System (ROS) або ж скриптових рішень з бібліотеками на Python чи C++.

ROS – це багаторівнева інфраструктура для розробки робототехнічних систем, яка забезпечує передачу даних між окремими модулями системи (нодами) через уніфіковані інтерфейси. У випадку дронів, оснащених автопілотом типу Pixhawk із прошивкою PX4 або ArduPilot, зв'язок між автопілотом і ROS забезпечується за допомогою пакету MAVROS, який виконує функцію моста між протоколом MAVLink та екосистемою ROS. Завдяки цьому, можна в режимі реального часу отримувати телеметрію, обробляти сенсорні дані та надсилати команди керування безпосередньо з ROS.

Однією з головних переваг ROS є підтримка сучасних бібліотек для комп'ютерного зору, зокрема OpenCV та TensorFlow. Це дозволяє реалізовувати алгоритми виявлення дефектів на поверхні об'єкта – наприклад, тріщин або ерозії країв лопатей – з використанням обробки відеопотоку в реальному часі. У відповідь на виявлену аномалію система може автоматично змінювати орієнтацію камери або

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

маркувати підозрілі ділянки на зображенні з подальшою передачею оператору для аналізу.

Ще однією актуальною функцією є побудова тривимірної моделі об'єкта огляду, яка реалізується на основі алгоритмів SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Наприклад, поєднання показників лідару та відеокамери дозволяє формувати 3D-реконструкцію вежі та лопатей турбіни. У ROS для цього можуть використовуватися такі пакети, як RTAB-Map або Cartographer. Отримана модель є корисною для оцінки геометричних деформацій та подальшого документування технічного стану об'єкта.

У ситуаціях, коли GPS-сигнал стає ненадійним (наприклад, під час польоту між лопатями турбіни), ROS дає змогу реалізувати альтернативні підходи до навігації, зокрема візуальну одометрію або оптичний потік. Ці методи базуються на аналізі послідовних зображень з камери, що дозволяє оцінити відносне переміщення дрона навіть без зовнішніх джерел позиціонування. Хоча GPS досі залишається основним засобом локалізації, використання допоміжних засобів, таких як візуальні сенсори, значно підвищує надійність системи у складних умовах.

Також ROS забезпечує високорівневе планування місії та контроль траєкторії польоту. Система може видавати автопілоту команди переміщення до конкретних координат або утримання фіксованої відстані до об'єкта. Це відкриває можливість реалізації складних сценаріїв, як-от спіральний обліт турбіни або рух за заданим контуром з урахуванням мінімізації енергоспоживання. Такі підходи зручно реалізуються за допомогою ROS-пакетів типу `move_base` або власноруч створених планувальників.

Окрему увагу заслуговує можливість інтеграції ROS із зовнішніми сервісами та наземною інфраструктурою. Наприклад, телеметричні дані або відеопотік можуть транслюватися через `ROS_bridge` в локальну мережу або інтернет, де їх оброблятиме віддалений сервер. Це дозволяє реалізовувати архітектуру розподіленої системи, в якій основні обчислення виконуються на наземному вузлі, а дрон виступає у ролі сенсорного пристрою.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Узагальнюючи, можна сказати, що ROS значно підвищує рівень автономності та інтелектуальних функцій безпілотної платформи. Відкритість екосистеми, велика кількість готових модулів і підтримка різних апаратних платформ роблять ROS доцільним вибором у контексті наукових і інженерних досліджень, зокрема при створенні бюджетної платформи для інспекції вітрових турбін.

Для використання ROS необхідно дещо більше ресурсів комп'ютера (1–2 ГБ ОЗП мінімум, що є на RPi4) та налаштування, але це бездонна скарбниця готових функцій для робототехніки. В контексті недорогого рішення варто зазначити, що ROS 1 повністю безкоштовний і відкритий, більшість пакетів теж відкриті. Отже, головна інвестиція – це час на освоєння.

Python-бібліотеки для дронів – більш легковаговий шлях, якщо не потрібна вся складність ROS. Наприклад, існує бібліотека DroneKit-Python (для ArduPilot), а також MAVSDK і pymavlink, які дозволяють писати скрипти для керування дроном через MAVLink. Таким чином, на компаньйонкомп'ютері можна запустити Python-скрипт, який буде, скажімо, періодично фотографувати, коли дрон опиниться у потрібній координаті, або автоматично відступати, коли відстань до лопаті стає меншою за поріг (зчитуючи дані з далекоміра). Це простіше, ніж ROS, і вимагає менше ресурсів. Бібліотеки Python дають доступ до всіх даних телеметрії (координати, швидкість вітру, статус батареї тощо) і до відправлення команд (напр., полетіти до точки, змінити режим польоту, керувати серво). Для нашої задачі можна швидко створити кастомну логіку – наприклад, скрипт, який облітає турбіну по колу, фотографуючи кожен лопать під різними кутами.

Окрім управління дроном, Python використовується для аналізу даних: бібліотеки OpenCV (комп'ютерний зір), NumPy/Pandas (обробка даних) можуть бути задіяні прямо на борту. Якщо, скажімо, немає потужного Jetson для нейромереж, можна виконати більш прості алгоритми – детектування контурів тріщин, підрахунок птахів на турбіні тощо – силами CPU.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розширення функціоналу через скрипти і ROS дозволяє дешево отримати “розумний” дрон. Ви не платите за дорогі пропрієтарні системи аналізу – ви самі (або спільнота) пишете потрібний код. Важливо, що ArduPilot і PX4 спроектовані з урахуванням такої інтеграції: MAVLink протокол відкритий, є детальна документація і приклади. Таким чином, за невеликого бюджету, але з часом на розробку, можна реалізувати можливості, які раніше були притаманні тільки дорогим комерційним дронам (наприклад, автоматичне виявлення пошкоджень в реальному часі).

Для повноти, зазначимо, що навіть без компаньйон-комп'ютера автопілоти ArduPilot підтримують скрипти на Lua – вони виконуються прямо на контролері. Це більш обмежено (Luаскрипти невеликі й спрощені), але теж може додати автономності (проте Python/ROS на комп'ютері однозначно дають більше свободи). З урахуванням усіх факторів, наявність компаньйон-комп'ютера з можливістю запускати ROS або хоча б Python-код – величезний плюс для платформи БПЛА моніторингу вітрових турбін.

На рисунку 2.1 зображено типову архітектуру апаратно-програмної платформи дрона для інспекції. У центрі – контролер польоту Pixhawk (у даному випадку Pixhawk 6X) зі встановленим на ньому відкритим автопілотом. До контролера підключені основні компоненти: дві GPS-антени (Primary GPS – модуль Ublox M8N, Secondary GPS – Ublox M9N для резерву та підвищення точності), порт UART/Telem2 використовується для підключення компаньйон-комп'ютера або телеметричного радіомодему, порти CAN 1/2 – для шинних периферій (напр. інтелектуальних сенсорів чи двигунів). Через інтерфейси I²C та SPI підключені інші сенсори: на схемі показано лазерний Lidar (VL53L1X) на I²C для вимірювання відстані, а також різні сервісні порти (USB для налаштування, SD-карта для логів, порти PWM для двигунів/серво). Ethernet-порт контролера з'єднується з бортовим комп'ютером для високошвидкісної передачі даних (актуально для Pixhawk 6X та подібних, які мають Ethernet) [10,21]. На борту дрона встановлені: блок живлення (Power Module PM02D) від акумулятора, розподільча плата (PDB) до ESC

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регуляторів і двигунів, ВЕС для живлення сервоприводів, підключений приймач RC (SBUS) для резервного ручного керування, а також HD FPV камера (SIYI) із передавачем SIYI МК15 (це приклад цифрового каналу, що поєднує управління і відео). Також присутній модуль телеметрії 915 МГц як альтернативний канал MAVLink (як підписано, він може вимагати власного живлення при підключенні). Вся система працює узгоджено: автопілот Pixhawk збирає дані датчиків (GPS, IMU, компас, барометр, далекомір) і стабілізує політ, комп'ютер (через Ethernet або UART) може отримувати цю інформацію і надсилати високорівневі команди, камера передає відео оператору, а дані телеметрії дублюються на наземну станцію по радіоканалу. Подібна архітектура є модульною: за потреби можна додати ще сенсори по шинах, змінити тип зв'язку (напр. замість МК15 використати 4G-модем, підключивши його до порту TELEM2), або встановити інший комп'ютер.

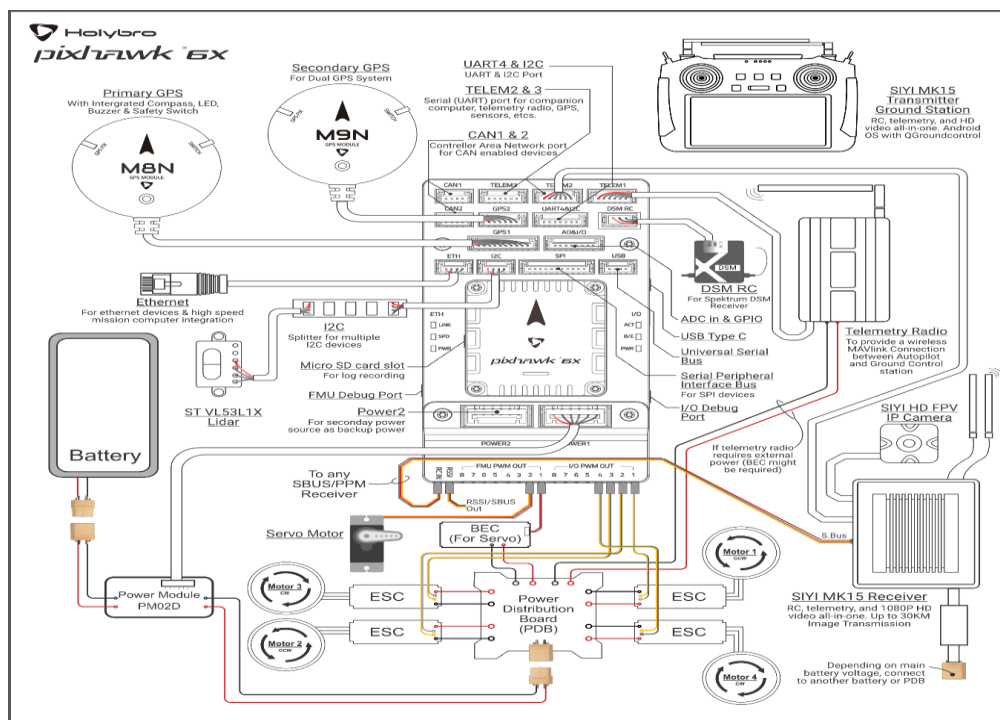


Рисунок. 2.1: – Архітурна схема апаратної платформи квадрокоптера на базі Pixhawk 6X для інспекції [21].

Як видно, системна архітектура БПЛА складається з трьох основних шарів: власне бортова частина (автопілот + датчики + навісне обладнання), канал зв'язку (радіо, Wi-Fi, 4G) та наземна частина (пульт або комп'ютер з програмним забезпеченням). У рамках відкритої платформи, наземна станція зазвичай це програма на ПК або планшеті (Mission Planner, QGroundControl), яка отримує телеметрію і відображає стан дрона, а також може отримувати відео з компаньйонкомп'ютера або зовнішнього приймача. Дрон може працювати як в ручному/ напівавтономному режимі (оператор задає точки або керує рухом, а дрон стабілізується і утримує позицію за допомогою автопілота), так і в повністю автономному режимі, де місія (маршрут обльоту турбіни) завантажена заздалегідь. У будь-якому випадку, наведена архітектура дає гнучкість для реалізації різних сценаріїв з мінімальними витратами.

Нижче підсумовано ключові переваги та недоліки різних компонентів та конфігурацій, розглянутих у цьому звіті. Це допоможе обрати оптимальне рішення під конкретні вимоги проекту.

Однією з ключових складових сучасної безпілотної системи є автопілот, який забезпечує контроль польоту, обробку даних із сенсорів та взаємодію з компаньйон-комп'ютером. У цій сфері домінують кілька відкритих платформ, кожна з яких має свої особливості, переваги й обмеження.

На сьогодні Pixhawk (у версіях 4, 5, 6) залишається де-факто стандартом у спільноті розробників БПЛА. Це відкрита апаратна платформа з широкою підтримкою програмного забезпечення PX4 та ArduPilot, яка поєднує в собі достатню продуктивність і великий набір доступних портів. Новіші моделі, зокрема Pixhawk 6, обладнані резервованими IMU, що підвищує надійність системи. Завдяки активній спільноті та великій кількості документації, Pixhawk легко інтегрується у складні проекти. До потенційних недоліків можна віднести потребу в додаткових модулях, таких як GPS, компас, або телеметрія, які зазвичай постачаються окремо. Крім того, недорогі аналоги можуть використовувати менш якісні сенсори, що знижує точність. Монтаж також вимагає певної акуратності –

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зокрема, необхідне амортизоване кріплення на пінопластовій або демпфуючій платформі.

Для більш вимогливих задач часто використовується Cube Orange, який належить до лінійки CubePilot. Цей модуль відзначається підвищеною надійністю завдяки потрійному резервуванню IMU, наявності подвійних барометрів та потужному H7 процесору. Крім того, вбудований приймач ADS-B дозволяє виявляти інші повітряні об'єкти, що підвищує безпеку. Cube Orange сумісний із екосистемою Pixhawk 2 і підтримує відкриті прошивки. Його головним недоліком є висока ціна та більші габарити, що можуть обмежити використання у компактних платформах. Також цей модуль може виявитися дещо складнішим для початківців через велику кількість опцій і параметрів налаштування.

У бюджетних проєктах часто використовуються альтернативні контролери, зокрема Matek H743-Wing або інші рішення на базі STM32 H7/F7. Вони є значно дешевшими і мають компактні розміри, що робить їх зручними для невеликих дронів. Такі плати забезпечують достатню продуктивність для роботи з ArduPilot, а деякі з них навіть мають вбудований OSD для FPV. Разом із тим, більшість з них мають лише один IMU без резервування, відсутню вбудовану пам'ять для логів, обмежену кількість UART-портів та не підтримують CAN або Ethernet. Це потребує врахування при проєктуванні системи. Незважаючи на обмеження, вони повністю підтримуються спільнотою ArduPilot і підходять для побудови економічно доцільних рішень.

Окремий напрямок становлять автопілоти на базі Linux, такі як Navio2, VOXL, BeagleBone Blue. Основна ідея полягає в об'єднанні автопілота і компаньйон-комп'ютера в одному пристрої. Це дає змогу запускати ROS або інше користувацьке програмне забезпечення безпосередньо на тому ж процесорі, що й контролює політ. Найбільш популярним є зв'язка Navio2 з Raspberry Pi, яка забезпечує повноцінну гнучкість та функціональність. Основним недоліком Linux-автопілотів є відсутність гарантій реального часу – у середовищі на базі Linux можливі затримки в обробці сигналів, що може знижувати надійність у критичних

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ситуаціях. Крім того, такі рішення мають вищу енергоспоживання і вимагають додаткової оптимізації на рівні операційної системи.

Компаньйон-комп'ютери виступають окремим важливим елементом у системі дрона. Найбільш поширеним рішенням є Raspberry Pi 4, що поєднує низьку ціну з достатньою продуктивністю. Наявність Wi-Fi, HDMI і великої кількості бібліотек робить її привабливою для розробників. Особливо добре RPi працює в поєднанні з ROS 2, що дозволяє реалізувати комп'ютерне бачення, обробку телеметрії та контроль польоту. До недоліків слід віднести відсутність апаратного прискорення для нейромереж, обмежену пропускну здатність інтерфейсів, а також потенційне перегрівання під навантаженням. Альтернативною є модуль Raspberry Pi CM4, який, за рахунок модульної архітектури, дозволяє краще інтегруватися з базовими платами типу Holybro CM4 Baseboard і має розширені можливості підключення камер, LTE тощо. Проте потребує окремої базової плати, що збільшує загальну вартість.

Для задач, де потрібна обробка відео в реальному часі, доцільним є використання NVIDIA Jetson Nano, який має апаратну підтримку нейромережевих обчислень через CUDA. Його продуктивності вистачає для більшості типових задач комп'ютерного зору, хоча вартість і енергоспоживання вищі, ніж у Raspberry Pi. У випадках, коли потрібно виконувати більш складні обчислення, застосовуються Jetson Orin Nano або Xavier NX, що демонструють суттєво вищу обчислювальну потужність, але й вимагають значно більше ресурсів – як фінансових, так і енергетичних. Це робить їх доцільними лише для високопродуктивних проєктів або за наявності фінансування (наприклад, грантів).

Альтернативними рішеннями можуть бути Odroid, BeagleBone або Intel UpBoard, які пропонують різноманіття архітектур і функціональних можливостей. Наприклад, деякі з них оснащені мікроконтролерами реального часу, або працюють на архітектурі x86, що може бути критичним для сумісності з певним програмним забезпеченням. Водночас, екосистема підтримки дронів для цих платформ менш розвинута, а прикладів інтеграції менше, що може ускладнити реалізацію проєкту.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, вибір апаратного забезпечення залежить від поставлених завдань і бюджету. Якщо пріоритетом є доступність і простота, оптимальним варіантом є Raspberry Pi 4 (4 GB) у зв'язці з Pixhawk. Для проектів з фокусом на штучний інтелект – Jetson Nano є виправданим вибором. Обидва варіанти мають гарну документацію і підтримку в спільноті, що дозволяє швидко реалізувати функціональну систему автономної інспекції.

Сенсорне забезпечення безпілотного літального апарата відіграє ключову роль у забезпеченні його автономності, точності позиціонування, стабілізації та зборі інспекційних даних. Кожен із сенсорів виконує свою спеціалізовану функцію, і лише їхня комплексна робота дозволяє досягти надійного та безпечного функціонування системи.

Насамперед, необхідно відзначити важливість GNSS-модуля (GPS), який забезпечує визначення абсолютної позиції дрона у глобальній системі координат. Сучасні мультисистемні приймачі здатні працювати з кількома супутниковими мережами одночасно, що підвищує надійність у помірно складних умовах. Хоча точність такого позиціонування зазвичай становить кілька метрів, що може бути критично при обльоті вітрових турбін з близької відстані, відсутність GPS значно ускладнила б реалізацію автономного польоту. До типових обмежень слід віднести вплив магнітних перешкод, відбиття сигналу від металевих конструкцій та можливість мультипасу. Тим не менш, для інспекції вітрових електростанцій використання GNSS вважається обов'язковим, а його похибки компенсуються іншими сенсорами.

Додаткову орієнтацію у просторі забезпечує компас, який визначає курс дрона відносно магнітного північного полюса. У поєднанні з GPS він дозволяє апарату утримувати стабільну орієнтацію під час польоту. Однак робота компаса суттєво залежить від електромагнітного оточення. В присутності джерел завад, таких як двигуни, лінії електропередач чи металеві вежі турбін, точність компаса може суттєво знизитись. Саме тому у більшості випадків компаси виносять окремо, зазвичай разом із GPS-модулем. Автоматизовані системи керування дозволяють у

випадку збоїв компаса переходити на альтернативні джерела орієнтації – наприклад, дані з гіроскопів.

Основою стабілізації та керування положенням дрона є інерціальна вимірювальна система (IMU), що поєднує в собі гіроскопи та акселерометри. Вона формує високочастотні сигнали про орієнтацію апарата в просторі та зміну кутових швидкостей. Сучасні мікроелектромеханічні (MEMS) IMU забезпечують необхідну точність за відносно низької вартості, а в системах типу Pixhawk використовуються сенсори високої якості з низьким рівнем шуму. Основним недоліком IMU є дрейф, який накопичується з часом, однак це частково компенсується фільтрами та злиттям даних з GPS. Крім того, у професійних автопілотах реалізується концепція резервування IMU, що знижує ризик відмови системи.

Для оцінки висоти польоту використовується барометричний сенсор, який визначає зміни атмосферного тиску і на основі цього оцінює висоту над рівнем моря. Його перевагою є здатність працювати незалежно від супутникових систем, однак варто враховувати чутливість до змін погоди та потоків повітря, що може викликати «плавання» показів. У зв'язку з цим барометр використовується здебільшого як допоміжне джерело, а на низьких висотах або поблизу об'єктів перевагу надають точнішим засобам вимірювання, зокрема лазерним далекомірам.

Зокрема, лазерний дальномір забезпечує високоточне вимірювання відстані до поверхні, що особливо важливо під час обльоту вітрових турбін. Його точність становить одиниці сантиметрів, а частота оновлення достатня для стабільного контролю висоти або бокової відстані під час огляду лопатей. Серед обмежень цього сенсора – відносно мала дальність дії (до 40–50 м у компактних моделях) і зниження ефективності під дією яскравого сонячного світла. Крім того, дальномір потребує регулярного обслуговування, зокрема очищення вікна від пилу або вологи. Незважаючи на ці особливості, він є бажаним компонентом інспекційної системи.

Центральну роль у збиранні візуальної інформації відіграє камера, яка дозволяє як оператору, так і алгоритмам комп'ютерного зору виявляти

пошкодження та дефекти на поверхні конструкцій. Сучасні 4K action-камери мають невелику вагу і доступну ціну, що робить їх доцільними навіть для бюджетних рішень. Проте якість зображення залежить від умов освітлення, тому інспекції доцільно проводити у денний або вечірній час, коли освітлення м'яке й відблиски мінімальні. Камери без оптичного зуму вимагають близького підльоту до об'єкта, що може створювати ризик зіткнення, тоді як камери з зумом значно дорожчі. Крім того, необхідна наявність стабілізованого підвісу, який сам по собі є чутливим до пошкоджень і вимагає налаштування.

У деяких випадках доцільно розглядати додаткові сенсори, такі як тепловізори, мультиспектральні камери або ультразвукові детектори. Ці пристрої дозволяють виявляти інформацію, недоступну в оптичному діапазоні: наприклад, тепловізор може зафіксувати локальне перегрівання конструкцій, мультиспектральна камера – зміни в покритті або обростання, а ультразвуковий детектор – внутрішні тріщини. Основним обмеженням цих засобів є висока вартість і складність інтеграції, тому в недорогих рішеннях їх застосування не є першочерговим. Проте вони можуть бути додані до системи модульно в разі потреби.

Одним із найпоширеніших способів зв'язку між дроном та оператором є використання Wi-Fi. Цей канал приваблює своєю простотою, низькою вартістю та високою швидкістю передачі даних. Завдяки сумісності з широким спектром пристроїв, від ноутбуків до смартфонів, він особливо зручний під час налагодження системи на малій відстані або для обміну даними між компаньйон-комп'ютером дрона та інженером, який перебуває поруч. Водночас, Wi-Fi має суттєві обмеження: невелика дальність дії та нестабільність сигналу в умовах перешкод значно знижують його надійність. У відкритому просторі, особливо при прямій видимості, він може забезпечити зв'язок на кількасот метрів, однак поблизу металевих конструкцій, зокрема вітрових турбін, сигнал часто відбивається або переривається. Через це Wi-Fi варто розглядати радше як додатковий канал, ніж як основний засіб зв'язку.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Більш надійним варіантом для телеметрії є радіоканал у діапазоні 915 МГц, який розроблено спеціально для безпілотних апаратів. Цей канал забезпечує стабільну передачу повідомлень за протоколом MAVLink, краще обходить перешкоди завдяки нижчій частоті та потребує мінімальних зусиль для налаштування. Однак його пропускну здатність досить обмежена, і передача відео в реальному часі недоступна. Через це він радше виконує функцію резервного каналу зв'язку, здатного підтримувати обмін критичними даними навіть у разі аварійного приземлення дрона.

У випадках, коли необхідна велика дальність при мінімальному енергоспоживанні, актуальною є технологія LoRa. Вона дозволяє підтримувати зв'язок на відстанях до 10–20 км без використання інтернету, що особливо важливо для польових місій на ізольованих територіях. Основним обмеженням тут є вкрай вузький канал зв'язку: фактично LoRa придатна лише для передачі координат або простих команд. У багатофункціональних системах вона може розглядатися як додатковий, резервний рівень комунікації - наприклад, для екстрених повідомлень або мінімальних сценаріїв керування.

Найбільш універсальним і сучасним рішенням є зв'язок через мобільні мережі 4G/LTE. Завдяки великій пропускну здатності та глобальному покриттю, цей канал дозволяє не лише передавати відео високої якості з мінімальною затримкою, але й забезпечує дистанційне керування дроном навіть з іншого міста чи країни, за умови налаштування відповідної інфраструктури. 4G дозволяє також залучити кількох спостерігачів одночасно – наприклад, операторів чи інженерів, які слідкують за польотом онлайн. Проте така система вимагає наявності стабільного мобільного зв'язку на місцевості та може бути обмежена юридично (наприклад, у країнах, де автономні дрони заборонені). Також це потребує певних витрат, як на мобільний трафік, так і на обладнання. Хоча, за бажання, можна використати недорогі роутери й плату типу Raspberry Pi, що робить це рішення доступним навіть для невеликих проєктів.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрему нішу займають пропріетарні HD відеолінки, які поєднують керування і відеопотік в одному рішенні. Їхні переваги – це оптимізація під дрони, автоматичне перемикавання частот і надійність двонаправленого зв'язку. Вони часто постачаються у комплекті з професійними пультами (як-от Herelink або його аналоги). Проте висока вартість (від 400 до 1200 доларів США), а також закритість протоколів роблять ці рішення малоприсадибними для академічних досліджень або проєктів типу DIY, де гнучкість і можливість доопрацювання мають вирішальне значення.

2.2 Програмне забезпечення та інтеграція

Одним із ключових інструментів для розробки автономних систем є Robot Operating System (ROS). Цей фреймворк відкриває широкі можливості для створення програмного забезпечення безпосередньо для дрона. Його головна перевага полягає у гнучкості, яку він надає: можна інтегрувати різноманітні сенсори, компоненти та алгоритми, зокрема візуальну навігацію, SLAM або планування маршруту. Підтримка декількох мов програмування, таких як C++ і Python, робить розробку ще доступнішою. Проте, попри свої переваги, ROS має досить високу криву навчання. Для ефективного використання необхідно засвоїти базові концепції – ноди, повідомлення, топіки, параметри. Крім того, ROS 1 не підходить для завдань реального часу, хоча ROS 2 частково усуває цей недолік. Загалом, ця платформа є доцільною у випадках, коли команда має відповідні технічні компетенції та достатньо часу на інтеграцію.

Альтернативою для швидкого прототипування та розробки скриптів є DroneKit або MAVSDK. Ці інструменти вирізняються простотою використання – декількох рядків коду достатньо для обміну командами з дроном або зчитування його даних. Особливо ефективними вони є в задачах автоматизації місій, таких як фотографування за розкладом чи повернення дрона у разі низького заряду батареї. Водночас, вони залишаються в межах протоколу MAVLink, що обмежує

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливості глибокої інтеграції. DroneKit-Python, наприклад, поступово втрачає актуальність, тоді як MAVSDK ще розвивається і потребує кращої документації. Незважаючи на це, для переважної більшості прикладних завдань цих бібліотек цілком достатньо.

Ще одним напрямком є використання OpenCV, TensorFlow та інших бібліотек для обробки зображень і машинного навчання. Вони дозволяють реалізовувати складні алгоритми без потреби у додатковому спеціалізованому обладнанні. Наприклад, можливо організувати відстеження краю лопаті турбіни і автоматизувати рух дрона відносно неї. Однак така реалізація вимагає глибшого розуміння алгоритмів комп'ютерного зору, а також певного досвіду в оптимізації обчислень.

Підсумовуючи, використання відкритої апаратної платформи типу Pixhawk у поєднанні з компаньйон-комп'ютером (наприклад, Raspberry Pi або Jetson Nano) створює гнучку, модульну та фінансово ефективну систему. Це рішення дозволяє реалізовувати складні функції за рахунок програмного забезпечення, а не дорогих апаратних засобів. Хоча така архітектура вимагає більше зусиль на етапі налаштування та інтеграції, вона відкриває шлях до поступового оновлення системи згідно з бюджетом і потребами проєкту. теж є перевагою в довгостроковій перспективі.

2.3 Висновок до другого розділу

Моніторинг вітрових турбін за допомогою БПЛА може бути реалізований на відносно недорогій, але ефективній платформі, якщо грамотно підібрати компоненти. Оптимальним ядром системи є відкритий автопілот Pixhawk (або еквівалент) у сполученні з бортовим компаньйонкомп'ютером (Raspberry Pi чи NVIDIA Jetson) – така зв'язка забезпечує як надійний політвий контроль, так і можливості для комп'ютерного аналізу даних [7,8] . До автопілота підключаються стандартні сенсори (GPS, IMU, компас, барометр) для навігації, а також додаткові

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

датчики – високороздільна камера на підвісі і лазерний далекомір – що є ключовими “очима” і “почуттями” дрона при огляді лопатей. Для зв’язку з наземною станцією збалансованим рішенням є використання подвійної системи: недорогого телеметричного радіо для базових команд і резерву та високошвидкісного каналу (Wi-Fi або 4G) для передачі відео та великого обсягу даних [13,16] .

Запропонована платформа сумісна з великим набором відкритого ПЗ – від ROS до Pythonбібліотек, що дозволяє додавати інтелектуальні функції без купівлі спеціалізованого обладнання. Це розширення програмними методами перетворює відносно дешевий дрон на потужний інструмент діагностики: наприклад, можна реалізувати автономний обліт турбіни з оптимізованою траєкторією або автоматичне розпізнавання дефектів в реальному часі [19] . Кожне з розглянутих рішень має свої плюси і мінуси – зведені вище – проте загальна тенденція така, що відкрита модульна платформа надає найбільше переваг. Вона гнучка, масштабована і підтримується спільнотою, що особливо важливо у швидко розвиваючійся сфері дронів.

На завершення, наведемо приклад: за оцінками оглядів, поєднання мультикоптера з автопілотом ArduPilot, обладнаного камерою та лідаром, і використанням автономних алгоритмів дозволяє зменшити час і вартість інспекції турбіни в разі порівняно з традиційними методами [22,19] . Таким чином, правильно підібрана і реалізована недорога платформа БПЛА не лише економить кошти, але й підвищує ефективність моніторингу, забезпечуючи швидке, безпечне та точне обстеження вітрових турбін.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТИЙ ПРОТОТИП КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ З ОДНИМ БПЛА ДЛЯ ОБ'ЇОТУ ОБ'ЄКТІВ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ З GPS НАВІГАЦІЄЮ

3.1 Реалізація модулів польоту і збору геоданих БПЛА

Створення дослідного зразка (прототипу) кіберфізичної системи моніторингу об'єктів вітрової енергетики (ВТЕ) за допомогою БПЛА є важливим етапом, що підтверджує можливість інтеграції апаратних і програмних компонентів у функціональну систему. Цей розділ описує процес збірки, налаштування та тестування прототипу, включаючи апаратну інтеграцію, калібрування, програмування логіки польоту та валідацію зібраних даних для інспекції вітрових турбін. Завдяки ретельному виконанню цих етапів прототип успішно виконав автономний обліт і зібрав дані, необхідні для аналізу стану вітроенергетичних установок.

Прототип побудовано на базі квадрокоптера з рамою діагоналлю, що забезпечує достатню вантажопідйомність, стабільність у вітряних умовах та маневреність для обліоту високих конструкцій (наприклад, рама 550-680 мм). Основою системи є сучасний контролер польоту, сумісний з ArduPilot/PX4, наприклад, Pixhawk 4 або більш продуктивні варіанти як Pixhawk 6X чи The Cube Orange для підвищеної надійності завдяки резервуванню сенсорів (IMU, барометр), що є критичним при роботі поблизу вітрових турбін. Чотири (або шість для гексакоптера) безколекторні двигуни з електронними регуляторами швидкості (ESC) підключено до силової розподільчої плати, яка забезпечує живлення від літій-полімерного (LiPo) акумулятора підвищеної ємності (наприклад, 6S) для тривалих польотів. Силовий модуль контролера польоту стабілізує напругу для електроніки та вимірює струм і напругу для моніторингу стану батареї. Контролер закріплено в центрі рами на ефективних демпферних прокладках, що мінімізують вібрації, які можуть впливати на точність інерціального вимірювального модуля (IMU).

					КвРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для навігації використано високоточний GNSS-модуль, наприклад, Ublox NEO-M8N або новіші M9N чи F9P для підтримки RTK, що забезпечує сантиметрову точність позиціонування, критичну для безпечного обльоту масивних металевих конструкцій турбін. Модуль розташований на високій щоглі (~15-20 см над рамою) для мінімізації електромагнітних перешкод. Зовнішній компас, інтегрований у GPS-модуль, використовується автопілотом для підвищення точності орієнтації, що є особливо важливим з огляду на можливі магнітні завади від конструкцій турбіни. Для підвищення надійності навігації в складних умовах (наприклад, поблизу лопатей) може бути інтегрований лазерний далекомір (LiDAR), такий як LightWare SF11/C або аналогічний, для точного утримання відстані до об'єкта інспекції.

Для зв'язку встановлено телеметрійний радіомодуль SiK (на частоті 915 МГц або 433 МГц), підключений до порту TELEM1 контролера. Його антена виведена назовні для забезпечення максимальної дальності. Для інспекцій великих вітропарків може розглядатися використання каналу зв'язку через 4G/LTE для передачі телеметрії та відео на необмежені відстані (за наявності покриття), як зазначено у вашому розділі 2. Швидкість MAVLink-порту встановлено на 57600 або 115200 бод. Наземна станція (наприклад, Mission Planner або QGroundControl) відображає дані про GPS-позицію, орієнтацію та стан систем БПЛА в реальному часі. Радіоприймач управління (RC) підключено для ручного керування та перевірок безпеки.

Корисне навантаження складається з камер, закріплених на 3-осьовому стабілізованому підвісі, розташованому під дроном. Це забезпечує можливість огляду всіх частин вітрової турбіни (лопати, гондола, вежа) під різними кутами.

RGB-камера: Використовується камера високої роздільної здатності (наприклад, 24 МП фото, 4К відео) з оптичним зумом (наприклад, Sony QX100, DJI Zenmuse Z30 або аналогічна), що дозволяє детально оглядати поверхню лопатей та

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інші елементи з безпечної відстані. Керування зумом та затвором камери реалізовано через виходи AUX контролера польоту.

Тепловізор може використовуватися для виявлення аномалій нагріву в компонентах гондоли (генератор, редуктор) або структурних дефектів у лопатях (наприклад, потрапляння вологи, розшарування). Модель типу FLIR Tau 2 або FLIR Lepton може бути інтегрована.

Для одночасного розміщення та паралельного спрямування сенсорів може бути виготовлений спеціальний кронштейн. Живлення камер та підвісу здійснюється від бортової мережі через окремий ВЕС або безпосередньо від акумулятора камери, якщо це передбачено конструкцією.

Після завершення процесу складання дрона було проведено комплексне калібрування всіх ключових систем за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, зокрема Mission Planner або QGroundControl. Одним з перших етапів стало налаштування інерційних сенсорів – акселерометрів та гіроскопів. Їх калібрування дозволило точно визначити нейтральні значення та усунути похибки у вимірюваннях, що критично важливо для стабільності польоту. Компас також було відкалібровано на відкритій місцевості, що дозволило мінімізувати вплив магнітних завад, які можуть виникати поблизу великих металевих об'єктів, таких як вежі вітротурбін.

Подальші дії передбачали налаштування радіокерування: здійснено прив'язку пульта до приймача та уточнення меж сигналів ШІМ, що відповідають крайнім положенням органів керування. Перевірка GPS-модуля підтвердила наявність стабільного 3D-фіксу та задовільну точність позиціонування, необхідну для автоматичної навігації. Регулятори швидкості (ESC) було відкалібровано таким чином, щоб забезпечити синхронну роботу усіх двигунів, що гарантує стабільний зліт і рівномірну тягу під час польоту.

Окрему увагу приділено налаштуванню параметрів стабілізації, зокрема PID-регуляторів. Їх значення адаптовано з урахуванням маси корисного навантаження та особливостей аеродинамічних умов, що виникають поблизу високих об'єктів,

					КвРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зокрема турбін. Це дозволяє забезпечити плавну траєкторію польоту навіть за наявності вітру або турбулентності. Важливим етапом стало також конфігурування функцій безпеки (Failsafe): при втраті сигналу GPS чи зв'язку з пультом дистанційного керування дрон автоматично повертається до точки зльоту за алгоритмом RTL. Аналогічно, при критичному зниженні заряду акумулятора активується процедура аварійного повернення.

На завершення було протестовано роботу камери та стабілізованого підвісу. Проведено калібрування орієнтації, перевірено чіткість зображення та здатність системи адекватно реагувати на команди керування, що є необхідною умовою для успішного збору візуальних даних під час інспекцій.

На початковому етапі перевірки працездатності системи було виконано низку тестових вильотів у ручному режимі керування, зокрема в режимах Stabilize та AltHold. Це дозволило оцінити базову стабілізацію дрона, а також здатність утримувати задану висоту. Після цього були проведені випробування у режимі Loiter, який передбачає автоматичне утримання позиції за сигналом GPS. Отримані результати засвідчили належну роботу автопілота, достатню точність позиціонування та плавність поведінки дрона у повітрі.

Для більш повного випробування можливостей автономного управління було сформовано сценарій автоматичного польоту навколо тестового об'єкта. У випадках, коли безпечне використання біля реальної вітрової турбіни було неможливим, застосовувалась імітація конструкції відповідної геометрії. Якщо ж дозволяли умови, дрон облітав реальну турбіну, яка на той момент не перебувала в експлуатації. Маршрут місії був заданий у програмному середовищі Mission Planner, де було сформовано шаблон дій, що включав зліт на задану висоту – зазвичай вище гондоли або верхівки турбіни – після чого здійснювалися облітні траєкторії навколо башти.

Окремим етапом стали вертикальні проходи вздовж кожної з лопатей, особливо в тих випадках, коли ротор було зупинено. Це дозволяло здійснити детальний візуальний огляд поверхні з мінімальним ризиком. Застосування камери

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

з оптичним зумом давало змогу обстежувати конкретні ділянки лопатей без необхідності критичного наближення дрона. Швидкість польоту у таких сценаріях змінювалась в межах від 2 до 5 м/с і обиралась відповідно до бажаного рівня деталізації зображень. Враховуючи необхідність подальшого аналізу або створення 3D-моделі об'єкта, було забезпечено належне перекриття кадрів – на рівні 60–80%, що дозволяє застосовувати фотограмметричні методи обробки.

Для запуску камери використовувався або тригер DO_SET_CAM_TRIGG_DIST, який активується через задану дистанцію, або таймер із визначеним інтервалом. Параметри знімання були адаптовані до конкретної швидкості дрона та оптики встановленої камери. Завершення місії відбувалося за стандартним сценарієм – автоматичне повернення дрона до точки зльоту (режим RTL).

У польових умовах прототип продемонстрував стабільну роботу – дрон впевнено утримував висоту і маршрут, виконував усі заплановані маневри автономно. Система тригера камери працювала надійно, а у випадку використання тепловізора вдалося зафіксувати як відео, так і окремі термозображення. Паралельно з польотом наземна станція здійснювала відображення телеметричних даних та траєкторії дрона у реальному часі, що дозволяло оперативно реагувати на будь-які відхилення від плану місії.

Обробка та Аналіз Зібраних Даних

Після посадки дані з SD-карт (фото, відео, логи польоту) перенесено на комп'ютер.

ісля завершення тестового польоту було здійснено комплексну обробку отриманих даних із метою оцінки якості зібраної інформації та підтвердження працездатності системи. Насамперед виконувалася обробка лог-файлів польотного контролера Pixhawk. Файл із розширенням .BIN було імпортовано до середовища Mission Planner, де за допомогою інструменту Geotag Images до знімків, зроблених RGB-камерою, було автоматично додано супутні GPS-координати, висоту та орієнтацію дрона. Ця інформація інтегрувалась у метадані EXIF кожної фотографії, що забезпечило можливість геоприв'язки кожного кадру.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У випадках, коли на борту був встановлений тепловізор, виконувалася подальша обробка відеоданих. Отримане теплове відео розділялося на окремі кадри, після чого здійснювалося їх синхронізування з RGB-фотографіями та телеметричними даними на основі часових позначок. Такий підхід дозволив забезпечити точну відповідність між зображеннями різного типу та параметрами польоту дрона, що критично важливо для подальшої оцінки технічного стану турбіни.

Для перевірки якості зібраного матеріалу було здійснено кілька видів аналізу. Зокрема, з RGB-знімків за допомогою фотограмметричного програмного забезпечення (наприклад, Agisoft Metashape або RealityCapture) створювалася тривимірна модель об'єкта інспекції – або реальної частини турбіни, або ж її макета. Побудова моделі засвідчила достатній рівень перекриття кадрів, коректне геотегування та придатну якість вхідних зображень для відтворення просторової структури. Це стало підтвердженням того, що система збору геоданих функціонує на належному рівні.

Окремо було проведено детальний візуальний аналіз RGB-знімків з метою виявлення дрібних дефектів або імітованих пошкоджень. Оцінювалася чіткість зображень, рівень деталізації, фокусування, а також здатність візуально ідентифікувати окремі зони інтересу на поверхні лопатей або вежі. У паралельному режимі здійснювався аналіз теплових кадрів, де особлива увага приділялась виявленню температурних аномалій. Подібні аномалії можуть свідчити про внутрішні пошкодження або дефекти в системі теплоізоляції.

На завершальному етапі було проведено валідацію телеметричних даних. Зокрема, оцінювалася точність GPS-навігації, рівень похибки позиціонування, стабільність утримання висоти та траєкторії в автоматичних режимах польоту. Аналіз показав, що система здатна виконувати заплановані місії з належним рівнем надійності та повторюваності, що підтверджує її придатність для подальшого впровадження у практичні інспекційні завдання.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ефективний моніторинг вітрових турбін за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) вимагає не лише наявності сучасних сенсорних модулів, але й побудови узгодженої інформаційної інфраструктури для накопичення, зберігання, обробки та візуалізації великих масивів даних. Важливою складовою є саме інтеграція усіх компонентів – сенсорів, апаратної платформи, каналів зв'язку, програмного забезпечення для аналізу та бази геоданих, що відображає результати інспекцій вітроенергетичних установок.

У сучасних прототипах БПЛА для комплексного збору інформації про стан вітрових турбін використовується мультисенсорна система, до складу якої входить, насамперед, RGB-камера високої роздільної здатності із функцією оптичного зуму, закріплена на триосьовому стабілізованому підвісі. Такий підвіс компенсує динамічні зміщення апарата у польоті та забезпечує можливість точного наведення оптики на досліджувані елементи турбіни. Живлення камери організовано через власний акумулятор або інтегровано до бортової енергосистеми дрона (через понижуючий ВЕС-модуль), що підвищує надійність роботи у різних експлуатаційних умовах. Управління всіма функціями камери, такими як зум, фокусування чи спуск затвора, реалізується за допомогою стандартних PWM-сигналів, що надходять із допоміжних портів (AUX) автопілота Pixhawk. Завдяки цьому можливо повністю автоматизувати процес фотографування у рамках складних автономних місій без необхідності ручного втручання оператора.

У деяких конфігураціях додатково інтегрується тепловізор –наприклад, модуль FLIR Tau 2 або його аналоги. Тепловізор встановлюється на окремому стабілізованому підвісі або у парі з основною камерою, а живлення та керування його функціями також синхронізуються із польотною електронікою дрона. Запуск запису чи захоплення окремих кадрів може відбуватися через ті самі PWM-канали або безпосередньо за допомогою команди автопілота (DO_DIGICAM_CONTROL, CAMERA_TRIGGER), що уніфікує протокол керування для всіх сенсорних пристроїв на борту.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Критичною вимогою для побудови якісної інформаційної системи моніторингу є забезпечення синхронізації даних між різними сенсорними модулями та польотними логами дрона. Для цього перед початком місії на борту проводиться синхронізація часу між автопілотом, GPS-модулем та компаньйон-комп'ютером (наприклад, Raspberry Pi). Протягом виконання польоту кожна активація камери чи тепловізора супроводжується фіксацією часу та географічних координат (маркери CAM або TRIG у логах Pixhawk). Завдяки цій прив'язці кожен знімок чи кадр легко ідентифікується із конкретною точкою траєкторії польоту. Зібрані дані (RGB-фото, теплові зображення, відео) мають власні часові мітки та/або можуть бути синхронізовані із логом польоту за допомогою відповідних скриптів для подальшого комплексного аналізу. Такий підхід забезпечує точне накладання інформації з різних сенсорів на просторову модель об'єкта інспекції.

Тестування системи збору даних передбачає кілька етапів – від наземних випробувань (калібрування камер, підвісу, синхронізації часу) до реальних польових місій над імітованими чи справжніми турбінами. Під час таких місій дрон виконує автономний облiт заданих точок маршруту, здійснюючи фотографування та/або теплову зйомку відповідно до розробленого сценарію. Всі зібрані дані зберігаються локально на SD-картах камер і компаньйон-комп'ютера, що гарантує їхню збереженість навіть у випадку втрати зв'язку з наземною станцією чи виникнення аварійної ситуації. Після завершення місії оператор завантажує всі файли для подальшої обробки, в тому числі – для накладення геотегів та створення 3D-моделей у спеціалізованих програмних пакетах.

Наступним етапом є створення і наповнення бази геоданих, яка відіграє ключову роль у зберіганні, систематизації та подальшому аналізі результатів інспекцій. Для цього використовується реляційна система управління базами даних PostgreSQL із розширенням PostGIS, що дозволяє ефективно працювати із геопросторовими типами даних та запитам. Після кожної інспекції дані структуровано імпортуються у базу: створюється новий запис про проведену інспекцію із вказанням дати, часу, ідентифікатору турбіни, відповідального

					КвРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оператора, погодних умов та інших атрибутів. Виявлені дефекти, аномалії чи пошкодження локалізуються за координатами і прив'язуються до відповідних елементів об'єкта (лопати, башти тощо) у таблицях defects або components. Геотеги, отримані із польотних логів, використовуються для точного нанесення місць дефектів на цифрову карту чи 3D-модель.

Такий підхід дає змогу формувати історію обслуговування та технічного стану кожної турбіни або окремого компонента, створювати звіти щодо ефективності моніторингу, здійснювати оперативний пошук інформації за будь-яким параметром (дата, об'єкт, тип дефекту, тощо). Крім того, завдяки інтеграції із ГІС-інструментами (наприклад, QGIS, web-GIS-додатками), можлива візуалізація об'єктів та виявлених дефектів на карті або у вигляді шарів поверх тривимірної моделі турбіни. Це суттєво спрощує процес планування подальших обльотів, оцінку пріоритетності ремонтів та ведення життєвого циклу об'єктів вітроенергетики.

Загалом, описаний комплексний підхід до інтеграції сенсорів та побудови бази геоданих забезпечує надійний, відтворюваний та масштабований механізм моніторингу вітрових турбін із використанням сучасних БПЛА, формуючи нові стандарти для об'єктів критичної інфраструктури у сфері відновлюваної енергетики.

Структура бази даних WindTurbineMonitor:

Таблиця 3.1 : Опис полів turbines (Вітрові турбіни)

Поле	Тип даних	Опис
id	SERIAL	Унікальний ідентифікатор турбіни (Первинний ключ)
turbine_name	VARCHAR(100)	Назва або код турбіни
geom	POINT (SRID=4326)	Геометрична точка з координатами основи турбіни (WGS 84)

ідентифікувати місце, обставини та параметри моніторингу. Такий підхід забезпечує можливість як зворотного трасування результатів, так і побудови статистики за різними критеріями для подальшого аналізу ефективності експлуатації.

На наступному етапі виконувалася комплексна обробка отриманих зображень – як RGB-фотографій високої роздільності, так і теплових кадрів, зібраних з бортового обладнання. Первинна обробка здійснювалася у ручному режимі, що дозволило закласти основу для подальшої автоматизації: для цього передбачено використання спеціальних скриптів на Python із залученням бібліотеки OpenCV, а також розгортання алгоритмів машинного навчання для виявлення, класифікації та ранжування виявлених пошкоджень. Такий перехід до автоматизованого аналізу є особливо актуальним для систем з великою кількістю даних і дозволяє значно скоротити час обробки, підвищуючи при цьому якість і точність виявлення дефектів.

Всі виявлені дефекти підлягали детальному аналізу з обов'язковим урахуванням їх просторового положення на об'єкті. Координати аномалій визначалися або на підставі геотегів, автоматично доданих до фотографій за допомогою логу польоту Pixhawk, або шляхом аналізу відповідної 3D-моделі вітротурбіни, побудованої на основі результатів фотограмметрії. Це дозволяло здійснювати точну просторову локалізацію дефектів –наприклад, ідентифікувати не лише саму турбіну, а й окрему лопать, секцію або вузол, де було виявлено порушення. Відповідна інформація фіксувалася у таблиці defects з обов'язковим зазначенням типу дефекту, ступеня його серйозності, розмірів та інших релевантних параметрів, що дозволяє в майбутньому організувати ефективний процес технічного обслуговування.

Завершальний крок полягав в оновленні інформації про об'єкт інспекції. Для цього у таблицях turbines або blades оновлювалися поля last_inspection_date та status, відображаючи актуальний технічний стан після виконаного обльоту. Таке оновлення дозволяє не лише оперативно фіксувати стан окремих об'єктів, але й

створює можливість формування гнучких звітів, а також ведення історії всіх змін для цілей технічного аудиту та планування профілактичних робіт. Запити до бази даних, у свою чергу, дають змогу швидко отримати перелік усіх виявлених дефектів для конкретної турбіни, проаналізувати їх типи, серйозність, точне розташування, а також побудувати часову динаміку змін.

Особливу роль у системі займає інтеграція ГІС-інструментів, зокрема QGIS, підключених до бази PostGIS. Це забезпечує можливість візуалізації просторового розташування усіх проінспектованих турбін і точок виявлених дефектів безпосередньо на електронній карті, а також дає змогу накладати ці дані на тривимірну модель об'єкта. Подібна візуалізація значно спрощує аналіз стану об'єктів для інженерів, дозволяє своєчасно реагувати на потенційні загрози і планувати подальші обльоти та ремонти з максимальною ефективністю.

Інтеграція RGB-камери високої роздільної здатності (з можливістю оптичного зуму) та, за потреби, тепловізора до складу бортової системи прототипу БПЛА дозволяє здійснювати синхронізований збір візуальних і теплових даних з точною географічною прив'язкою. Всі знімки та телеметричні дані зберігаються локально на SD-картах, що гарантує їх збереження навіть у разі тимчасового порушення зв'язку. Синхронізація відбувається за часовими мітками, а також за даними журналу польоту, що дозволяє зіставляти отримані зображення з позицією дрона в момент знімання –це, в свою чергу, створює передумови для комплексного та багаторівневого аналізу отриманої інформації.

Створена база геоданих на платформі PostgreSQL/PostGIS ефективно акумулює всю інформацію про вітрові турбіни, виконані інспекції та виявлені дефекти. Вона підтримує гнучкі просторові запити, дає змогу швидко отримати як агреговану, так і деталізовану інформацію для будь-якого об'єкта чи періоду часу, а також підтримує засоби візуалізації як у ГІС-середовищах, так і через зовнішні інтерфейси.

Виконаний тестовий обліт та подальша обробка даних підтвердили повну працездатність розробленої системи: імітовані або реальні аномалії були виявлені,

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

правильно локалізовані і прив'язані до відповідних елементів турбіни чи лопаті, а всі отримані результати коректно відображені у базі. Така інтеграція апаратних, програмних та інформаційних компонентів формує надійну основу для подальшого розгортання автоматизованого моніторингу стану вітроенергетичних об'єктів, дозволяючи не лише вчасно ідентифікувати потенційно небезпечні дефекти, а й повністю інтегрувати процеси обстеження у цифрову модель життєвого циклу об'єкта.

3.2 Принципова електрична схема та алгоритм роботи дрона

Розробка прототипу БПЛА для інспекції вітроенергетичних об'єктів вимагала глибокої інтеграції апаратних, програмних і комунікаційних модулів у єдину функціональну систему. Центральним елементом у цій архітектурі є автопілот Pixhawk 4, що виконує функції низькорівневого керування польотом, стабілізації та збору телеметрії, водночас взаємодіючи з компаньйон-комп'ютером (наприклад, Raspberry Pi 4 або Jetson Nano) для високорівневої обробки, автономної навігації й аналізу даних. Така модульна архітектура забезпечує максимальну гнучкість і масштабованість рішення – як на етапі експериментів, так і в реальних умовах промислової експлуатації.

Живлення і електричні зв'язки організовано так, щоб гарантувати як безперервність роботи всіх критичних вузлів, так і безпеку при будь-яких аваріях. Основним джерелом енергії виступає літій-полімерний акумулятор з ємністю, розрахованою на тривалість польоту 25–40 хвилин залежно від ваги корисного навантаження, сили вітру та профілю місії. Акумулятор під'єднується до силової розподільчої плати (Power Distribution Board), яка розподіляє енергію на чотири безколекторні двигуни (через ESC) та подає живлення на модуль живлення Pixhawk. Останній стабілізує напругу (5 В для контролера й сенсорів) та постійно моніторить параметри живлення, попереджаючи про розряд чи перенавантаження. Додатково встановлюється сигнальний модуль розряду, який, підключаючись до

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

балансувального роз'єму акумулятора, генерує гучний сигнал у разі досягнення критичного рівня заряду – це особливо важливо для місій із великим радіусом обльоту.

До основних виходів Pixhawk підключені чотири електронні регулятори швидкості (ESC), що керують обертанням безколекторних двигунів. ESC отримують PWM-сигнали з виходів MAIN OUT 1–4 Pixhawk, кожен з яких відповідає окремому мотору. Напрямки обертання сусідніх гвинтів чергуються (два за годинниковою стрілкою, два проти) – це дозволяє знизити ризик виникнення неконтрольованого крутного моменту, забезпечуючи стійкість навіть у складних погодних умовах. Надійність електричних з'єднань додатково забезпечується якісними конекторами й ізоляцією; у проекті передбачено можливість швидкої заміни вузлів у польових умовах.

Навігаційні й комунікаційні модулі відіграють критичну роль для автономної роботи дрона. GPS-модуль із вбудованим компасом (наприклад, на чипі Ublox NEO-M8N або M9N) підключається до Pixhawk через окремий порт, що забезпечує одночасну передачу даних позиціонування (через UART) та даних орієнтації (через ІС для компаса). Модуль монтується на довгій пластиковій штанзі й винесений на безпечну відстань від основної електроніки – це мінімізує вплив магнітних полів та електричних перешкод, характерних для силових ліній живлення і роботи двигунів. На корпусі GPS-модуля інтегровано LED-індикатор стану системи та кнопку Safety (розблокування моторів), які також з'єднані з автопілотом і виконують функції візуального контролю й безпеки.

Радіомодем телеметрії підключено до TELEM-порту Pixhawk (UART), забезпечуючи стійкий двонаправлений зв'язок між дроном і наземною станцією. Для збільшення дальності й надійності можуть використовуватись як класичні радіомодеми на 915/433 МГц (з розрахунковою дальністю до 5 км), так і 4G/LTE-модулі для передачі телеметрії й відео через мобільну мережу. Наземна станція отримує в реальному часі всі ключові дані про стан дрона (позиція, висота, швидкість, статус батареї, сигнали системи аварійної зупинки). Окремий RC-

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приймач дозволяє здійснювати ручне або аварійне перехоплення керування - зокрема для початкових тестових польотів, відпрацювання маневрів і у випадку виникнення позаштатних ситуацій.

Модулі збору даних представлені RGB-камерою високої роздільності (4K+) і за потреби – тепловізором. Камери монтуються на тривісному стабілізованому підвісі (gimbal), що керується через AUX-виходи Pixhawk або безпосередньо компаньйон-комп'ютером. Для керування спуском затвору (активації фото чи відео) використовується команда автопілота (DO_CAM_TRIGG_DIST) або зовнішній тригер. Передбачена можливість підключення додаткових сенсорів (наприклад, лазерного далекоміра або мультиспектральної камери) – архітектура системи дозволяє масштабувати функціонал залежно від цілей інспекції.

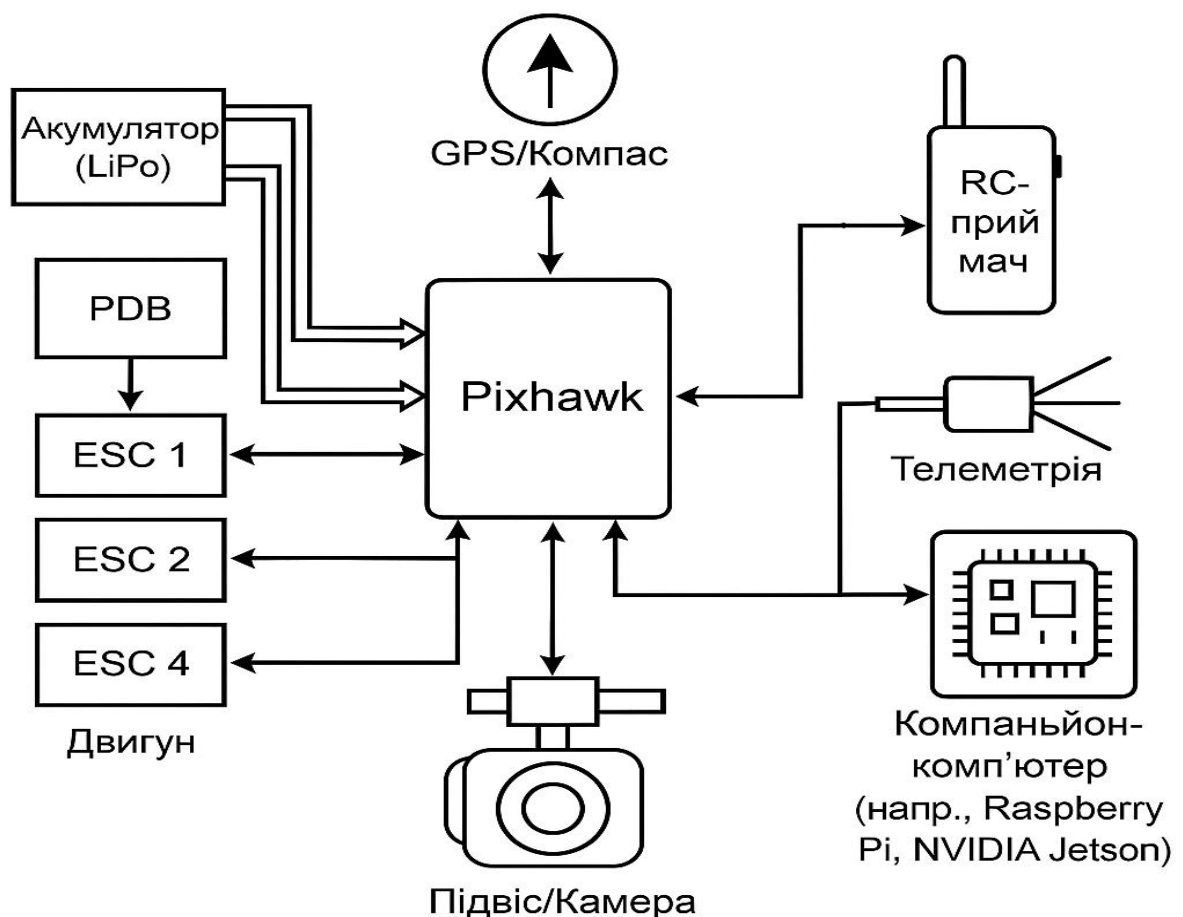


Рисунок 3.1 – Принципова електрична схема дрона.

Ініціалізація та калібрування проходить у програмному забезпеченні Mission Planner або QGroundControl: налаштовується робота IMU (акселерометри, гіроскопи), GPS-модуля, компаса, ESC, PID-регуляторів, RC-приймача та failsafe-алгоритмів. Особливу увагу приділяють правильній калібровці компаса (на відкритій місцевості, подалі від металевих об'єктів) та перевірці 3D-фіксу GPS, що дозволяє уникнути збоїв орієнтації й забезпечує точність геоприв'язки під час інспекції.

Алгоритм автономної роботи дрона реалізовано на базі прошивки ArduPilot або PX4, які є потужними та гнучкими відкритими платформами для керування безпілотними літальними апаратами. Цей алгоритм включає низку послідовних етапів, що забезпечують безпечне та ефективне виконання інспекційної або розвідувальної місії.

Початок місії супроводжується автоматичним самотестуванням усіх сенсорів і модулів, включно з GPS, компасом, гіроскопом, акселерометром, барометром, а також перевіркою працездатності камери та зв'язку. Система також аналізує параметри безпеки польоту: стан батареї (battery failsafe), наявність ARM-дозволу, справність авіоніки та відповідність умовам для зльоту (наприклад, сигнал GPS, рівень шуму магнітного поля, відсутність перешкод).

Після підтвердження всіх критеріїв, дрон виконує автоматичний зліт до задалегідь визначеної безпечної висоти – зазвичай у діапазоні 20–30 метрів, щоб уникнути зіткнення з наземними об'єктами. Далі відбувається виконання місії за маршрутом, який складається з послідовності waypoint-ів, що можуть включати орбітальні обльоти навколо вежі, вертикальні огляди лопатей, фіксовані зависання в точках з деталізацією або навіть сканування за спеціальними шаблонами.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проблемні ділянки, а й будувати інтерактивні карти й 3D-моделі для порівняння стану об'єктів у різні періоди. У випадку великої кількості об'єктів додається планувальник маршрутів: для автоматичної побудови місії використовуються SQL-запити до таблиці турбін, після чого формується файл місії для Mission Planner або QGroundControl.

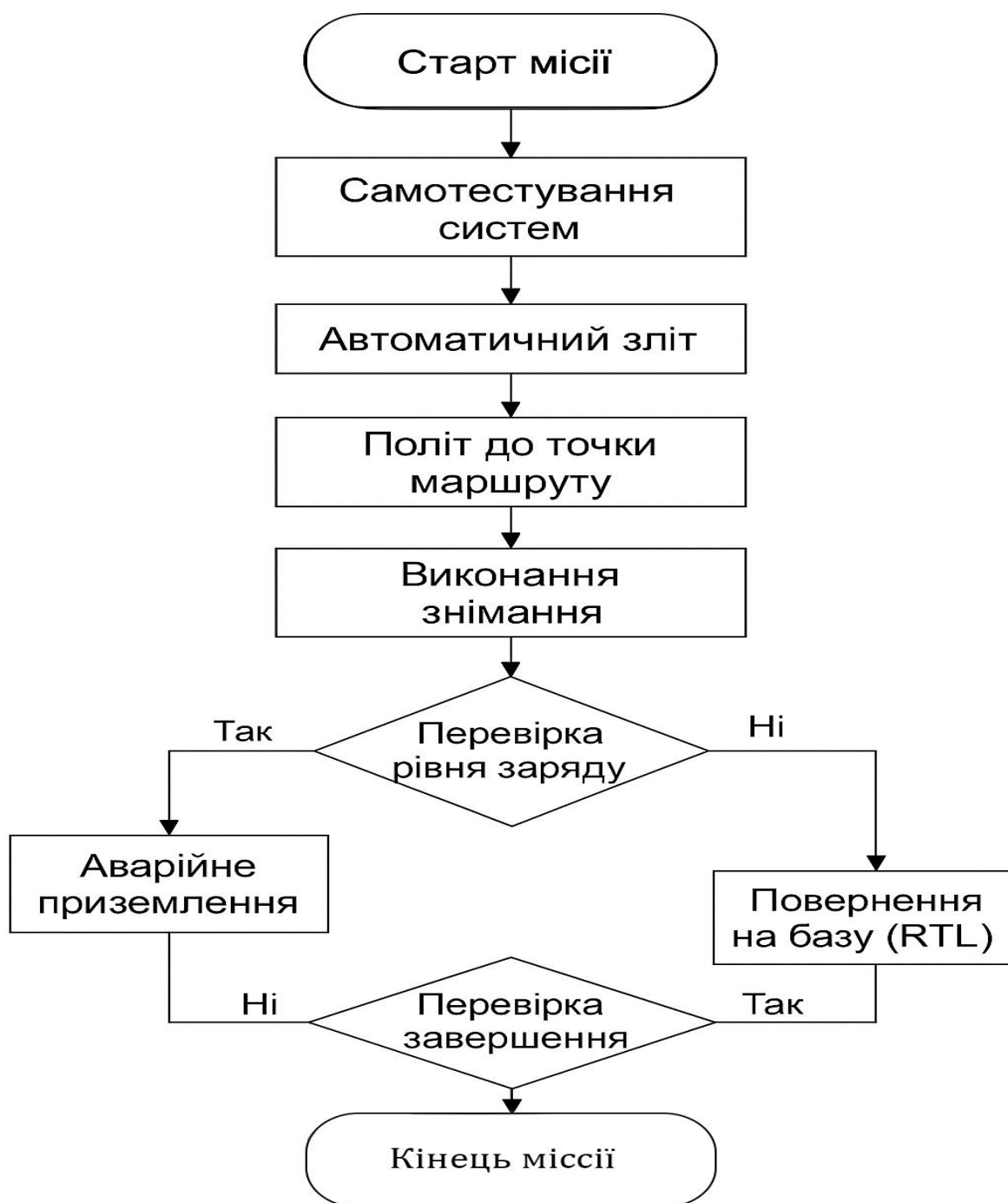


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритму автономного польоту БПЛА.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Завдяки такій глибоко інтегрованій структурі прототип БПЛА здатний автономно виконувати завдання з інспекції вітрових електростанцій, здійснювати надійний контроль навігації та збору даних навіть у складних умовах, автоматично аналізувати інформацію та підтримувати актуальну базу дефектів із геоприв'язкою. Розширення системи можливе шляхом підключення нових сенсорів або впровадження алгоритмів глибокого навчання для підвищення точності аналізу, що забезпечує гнучкість і розвиток рішення відповідно до потреб галузі. Крім того, така архітектура сприяє економії часу й ресурсів, зменшуючи необхідність у постійному людському втручанні. Водночас модульна побудова забезпечує простоту технічного обслуговування та оперативне оновлення окремих компонентів, що значно збільшує термін експлуатації пристрою. Впровадження цього рішення допомагає мінімізувати ризики людського фактору і значно підвищити рівень безпеки під час виконання інспекційних робіт.

3.3. Висновки до третього розділу

У третьому розділі проведена реалізація прототипу кіберфізичної системи для інспекції об'єктів вітроенергетики засвідчила його технічну готовність до автономного виконання завдань з моніторингу. У ході проведених експериментальних випробувань підтверджено надійність роботи автопілота та коректну функціональність навігаційної підсистеми, що дозволило безпечно і точно виконувати польоти за складними тривимірними траєкторіями поблизу високих інженерних конструкцій навіть в умовах змінних погодних та вітрових навантажень. При цьому ретельно контролювалися параметри безпеки та стабільності, що гарантувало високий рівень захисту обладнання та персоналу.

Система стабілізації, керування та корекції маршруту продемонструвала стабільну і прогнозовану поведінку, функціонуючи в межах очікуваних параметрів протягом усього циклу тестових польотів. Це забезпечило не лише точне позиціонування дрона в заданих координатах, але й оперативну реакцію на

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зовнішні впливи, такі як поривчастий вітер чи турбулентність, що характерні для зон розташування вітрових турбін. Завдяки цьому вдалося мінімізувати ризики зіткнення з перешкодами та зберегти високий рівень безпеки польотів.

Камера високої роздільної здатності, інтегрована на стабілізованому підвісі, також продемонструвала стабільну та ефективну роботу. Вона забезпечила отримання високоякісних та чітких зображень, які піддаються значному масштабуванню без втрати інформативності, що важливо для виявлення навіть дрібних дефектів. Тестування тепловізійної камери, за умови її наявності, також підтвердило стабільну та якісну роботу, що дозволило отримувати достовірні теплові зображення протягом усього циклу польоту.

Особлива увага була приділена географічній прив'язці отриманих даних. Реалізована система геотегування забезпечила повну відповідність зібраних зображень до фактичних координат польоту, що підтвердило надійність та ефективність комунікації між навігаційними модулями та сенсорами. Такий підхід дозволяє створювати точні геопросторові карти дефектів, які можуть використовуватися для подальшого аналізу та планування ремонтних заходів.

Апаратна платформа показала достатній запас обчислювальної потужності та енергетичних ресурсів, що дає змогу реалізовувати більш складні сценарії автономного огляду, зокрема адаптивну маршрутизацію, автоматичне уникнення перешкод та динамічне коригування польоту в реальному часі. Встановлення компаньйон-комп'ютера (наприклад, Raspberry Pi або NVIDIA Jetson) розширює функціональні можливості системи, відкриваючи шлях до onboard-аналізу отриманих даних за допомогою передових алгоритмів комп'ютерного зору, глибокого навчання, а також інтеграції з Robot Operating System (ROS), що детально було описано у попередніх розділах.

Така архітектура забезпечує не лише високу гнучкість, але й легку масштабованість та можливість модернізації відповідно до нових технологічних тенденцій і конкретних потреб замовника. Вона формує міцний технологічний фундамент для подальшого розвитку системи аналізу даних, створення ефективної

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

геопросторової бази дефектів та впровадження елементів штучного інтелекту у процеси технічного обстеження.

Таким чином, створений прототип не тільки підтвердив здатність до ефективної автономної інспекції енергетичних об'єктів, але й створив необхідні передумови для розширення його функціоналу та інтеграції у сучасні системи технічного моніторингу та обслуговування вітрових електростанцій.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі «Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією» було комплексно вирішено завдання автоматизованої інспекції вітрових турбін із використанням сучасних безпілотних технологій.

У першому розділі проведено детальний аналіз предметної області – визначено переваги застосування БПЛА у сфері вітроенергетики, акцентовано на зростаючій актуальності автоматизованого моніторингу стану турбін, а також розглянуто основні виклики: необхідність високої точності позиціонування, стабільності польоту в умовах сильного вітру, обмеженого часу автономної роботи та складності виявлення дефектів конструкцій. Окреслено сучасні технічні вимоги до кіберфізичних систем моніторингу, сформульовано завдання оптимізації збору й передачі даних, а також підвищення рівня автоматизації процесу аналізу отриманих зображень.

У другому розділі спроектовано апаратно-програмну архітектуру системи: обґрунтовано вибір платформи на основі квадрокоптера з польотним контролером Pixhawk, компаньйон-комп'ютером Raspberry Pi 4, сучасними GPS-модулями та набором сенсорів для забезпечення надійної стабілізації, навігації та збору інформації. Детально описано структурну схему підключення компонентів, принципову електричну схему живлення та передачі сигналів. Розглянуто інтеграцію бортових камер (RGB та, за необхідності, тепловізійної), а також організацію каналу зв'язку з наземною станцією. Значну увагу приділено розробці програмних модулів, що забезпечують виконання автономних польотних місій, синхронізацію даних та автоматичне формування маршрутів обльоту за допомогою спеціальних скриптів. Описано особливості створення і наповнення бази геоданих на основі PostgreSQL/PostGIS для довгострокового зберігання та аналізу результатів інспекцій.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У третьому розділі проведено практичну реалізацію розробленого прототипу та його випробування у польових умовах. В результаті тестового обльоту дрон успішно виконав автономний маршрут навколо об'єкта інспекції, здійснив збір візуальних та теплових зображень, які було автоматично геотеговано на основі логів польоту. За допомогою Python-скриптів проведено обробку отриманих даних: виявлено та класифіковано імітовані дефекти, прив'язано їх до просторових координат і відповідних елементів турбіни. Усі результати інспекції інтегровано в базу геоданих, реалізовано функції формування звітів і візуалізації у ГІС-програмах. Розроблено покрокові інструкції з підготовки місії, налаштування апаратури, виконання обльоту й аналізу даних, що дозволяє забезпечити повторюваність і безпеку процесу.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Heo S.-J., Na W.S. Review of Drone-Based Technologies for Wind Turbine Blade Inspection. *Electronics*. 2025. Vol. 14. No. 2. P. 227.
2. Chen X., Eder M.A., Shihavuddin A., Zheng D. A Human-Cyber-Physical System toward Intelligent Wind Turbine Operation and Maintenance. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 2. P. 561–570.
3. Memari M., Shakya P., Shekaramiz M., Seibi A.C., Masoum M.A. Review on the advancements in wind turbine blade inspection: Integrating drone and deep learning technologies for enhanced defect detection. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 33236–33282.
4. Yang C., Liu X., Zhou H., Ke Y., See J. Towards accurate image stitching for drone-based wind turbine blade inspection. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 203. P. 267–279.
5. Kulsinskas A., Durdevic P., Ortiz-Arroyo D. Internal wind turbine blade inspections using UAVs: Analysis and design issues *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 294.
6. Moolan-Feroze O., Karachalios K., Nikolaidis D.N., Calway A. Simultaneous drone localisation and wind turbine model fitting during autonomous surface inspection *arXiv preprint arXiv:1904.04523*. 2019.
7. Sikora T., Markovic L., Bogdan S. Towards Operating Wind Turbine Inspections using a LiDAR-equipped UAV *arXiv preprint arXiv:2306.14637*. 2023.
8. Yang C., Zhou H., Liu X., Ke Y., Gao B., See J. BladeView: Toward Automatic Wind Turbine Inspection With Unmanned Aerial Vehicle *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023. Vol. 70. No. 3. P. 7293–7303.
9. Wang L., Zhang Z. Automatic detection of wind turbine blade surface cracks based on UAV-taken images *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. Vol. 64. No. 9. P. 7293–7303.
10. Pixhawk 6X/6X Pro Flight Controller – Copter documentation. URL: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-holybro-pixhawk6X.html> (дата звернення: 22.05.2025).

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Iyer A., Nguyen L., Khushu S. Learning to identify cracks on wind turbine blade surfaces using drone-based inspection images *arXiv preprint arXiv:2207.11186*. 2022.

12. Holybro Pixhawk 6C FC Module w/ Plastic Case – Lumenier URL: <https://www.lumenier.com/products/holybro-pixhawk-6c-fc-module-w-plastic-case?Title = Default+Title> (дата звернення: 22.05.2025).

13. Overview – Holybro Docs URL: <https://docs.holybro.com/autopilot/pixhawk-6c/overview> (дата звернення: 22.05.2025).

14. The Cube Orange Standard Set (ADS-B Carrier Board) UAV Flight Controller – World Drone Market. URL: <https://worldronemarket.com/product/the-cube-orange-standard-set/> (дата звернення: 22.05.2025).

15. Cost Effective Pixhawks – ArduCopter – ArduPilot Discourse. URL: <https://discuss.ardupilot.org/t/cost-effective-pixhawks/123293> (дата звернення: 22.05.2025).

16. CUAV LTE Link SE 4G Drone Telemetry – World Drone Market URL: <https://www.worldronemarket.com/product/cuav-lte-link-se-4g-drone-telemetry/> (дата звернення: 22.05.2025).

17. Standard UAV architecture: the flight controller is directly connected... – ResearchGate URL: https://www.researchgate.net/figure/Standard-UAV-architecture-the-flight-controller-is-directly-connected-to-the-receiver_fig1_352851692 (дата звернення: 22.05.2025).

18. LR24-F 2.4G LoRa Radio Telemetry For Pixhawk/ArduPilot/PX4 plug and play – RoboFusion URL: <https://robofusion.net/products/lr24-f-2-4g-10km-lora-radio-telemetry-for-pixhawk-ardupilot-px4-plug-and-play> (дата звернення: 22.05.2025).

19. Is LoRa a good option for a long range drone. : r/robotics – Reddit URL: https://www.reddit.com/r/robotics/comments/xrd4q4/is_lora_a_good_option_for_a_long_range_drone/ (дата звернення: 22.05.2025).

20. Review of Drone-Based Technologies for Wind Turbine Blade Inspection – MDPI URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/2/227> (дата звернення: 22.05.2025).

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Raspberry Pi Companion with Pixhawk | PX4 Guide (main) URL: https://docs.px4.io/main/en/companion_computer/pixhawk_rpi.html (дата зверення: 22.05.2025).

22. Case Study: Designing an AI Driven Inspection Drone for Wind Farms – ConnectTech URL: <https://connecttech.com/case-study-ai-driven-inspection-drone-wind-farms-alerion/> (дата зверення: 22.05.2025).

23. , Y., Cheng Z., Sandvik P.C., Gao Z., Moan T., Van Buren E. Numerical modeling and analysis of the dynamic motion response of an offshore wind turbine blade during installation by a jack-up crane vessel *Ocean Engineering*. – 2018. Vol. 165. P. 353–364.

24. Kumar P., Saravanan R., Bharathiraja R., Rathnasabapathy C.S. Risk management of work at height in higher-capacity wind turbines *Journal of Namibian Studies*. 2023. Vol. 35. P. 3815–3839.

25. Jin X., Gan Y., Ju W., Yang X., Han H. Research on wind turbine safety analysis: Failure analysis, reliability analysis, and risk assessment *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2016. Vol. 35. P. 1848–1861.

26. Wang Y., Yoshihashi R., Kawakami R., You S., Harano T., Ito M., Komagome K., Iida M., Naemura T. Unsupervised anomaly detection with compact deep features for wind turbine blade images taken by a drone *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*. 2019. Vol. 11. No. 1. P. 1–7.

27. Kaycı B., Demir B.E., Demir F. Deep learning based fault detection and diagnosis in photovoltaic systems *Renewable Energy*. – 2020. Vol. 145. P. 729–738.

28. Shihavuddin A.S.M., Chen X. DTU – Drone inspection images of wind turbine *Mendeley Data*. 2018. Version 2. DOI: 10.17632/hd96prn3nc.2.

29. Gohar I., Kean Y.W., Halimi A., See J. Review of state-of-the-art surface defect detection on wind turbine blades through aerial imagery: Challenges and recommendations *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 123. P. 107123.

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

30. Zhao Y., Cheng Z., Sandvik P.C., Gao Z., Moan T., Van Buren E. Numerical modeling and analysis of the dynamic motion response of an offshore wind turbine blade during installation by a jack-up crane vessel *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 165. P. 353–364.

31. Zhang Z., Shu Z. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Assisted Damage Detection of Wind Turbine Blades: A Review *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 169. P. 113–128.

32. Remote Wind Turbine Inspections: Exploring the Potential of Multimodal Drones // Drones. – 2024. Vol. 9. No. 1. . URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/1/4> (дата зверення: 22.05.2025).

33. Karakuş G., Ulukan A. Wind Turbine Inspection with Drone: Advantages and Disadvantages *International Journal of Renewable Energy Research*. 2023. Vol. 13. No. 2. P. 89–98.

34. Gohar I., Kean Y.W., Halimi A., See J. Review of State-of-the-Art Surface Defect Detection on Wind Turbine Blades through Aerial Imagery: Challenges and Recommendations *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 123. P. 107123.

35. SpectX, TNO, GE Vernova, LM Wind Power. Drone X-ray Inspection for Wind Turbine Blades: A Collaborative Project *WindTech International*. 2025. Vol. 19. No. 1. P. 34–38.

36. Deep Trekker. Remote Wind Turbine Blade Inspections Using Submersible Crawler Systems *Unmanned Systems Technology*. – 2025. Vol. 12. No. 3. P. 22–26.

37. SolDrones. Wind Turbine Drone Inspection Guide: Detecting Blade Delamination and Core Faults *SolDrones Blog*. 2024. –URL: <https://soldrones.com/blog/wind-turbine-drone-inspection-guide/>

38. Data Insights Market. Wind Turbine Drone Inspection Market Analysis and Forecast 2025–2033 *Data Insights Market Reports*. 2025. –URL: <https://www.datainsightsmarket.com/reports/wind-turbine-drone-inspection-32755>

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

39. Fact.MR. Wind Turbine Drone Inspection Market Size & Share – 2035 // Fact.MR Market Research Report. – 2025. – URL: <https://www.factmr.com/report/wind-turbine-drone-inspection-market>

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

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

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

43. Aghaei M., Grimaccia F., Leva S. Solar Photovoltaic Hotspot Inspection Using Unmanned Aerial Vehicle Thermal Images at a Solar Field in South India. *Energies*. 2020. Vol. 13. No. 23. P. 6422. URL: <https://doi.org/10.3390/en13236422>.

44. Zhang J., Liu X., Wang Y. UAV-Based Sensing and Imaging Technologies for Power System Inspection: A Review. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2023. Vol. 38. No. 3. – P. 215–237. URL: <https://doi.org/10.1080/10589759.2022.2095678>.

45. Guzzini P., Delair J. Precise Location Key to Usable Data for Energy Sector. *Inside Unmanned Systems*. 2019. P. 1–5. URL: <https://insideunmannedsystems.com/precise-location-key-to-usable-data-for-energy-sector/> (дата зверення: 5.05.2025).

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

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

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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

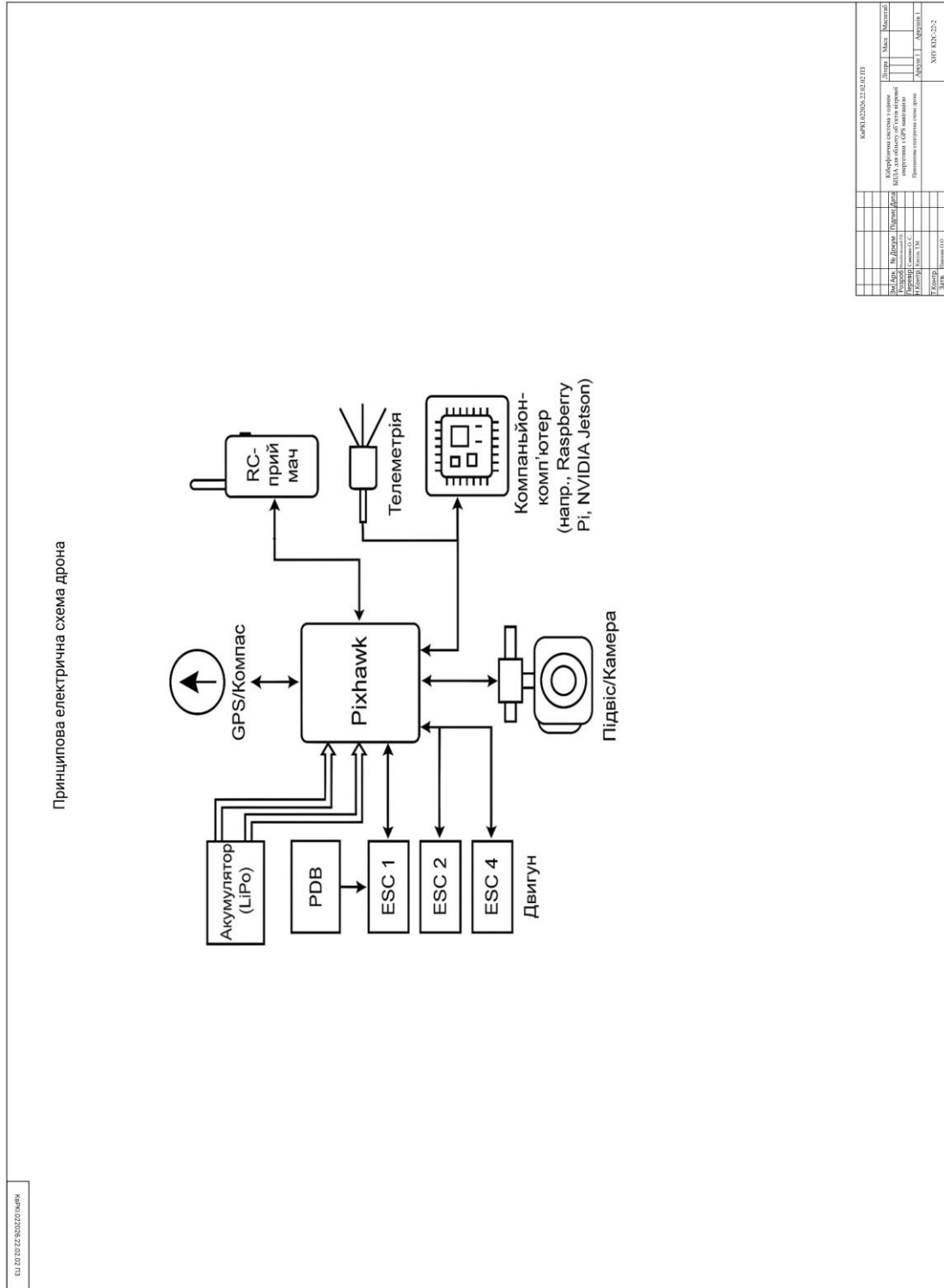
50. Wang H., Zhao D., Liu D. A Cyber Physical System Framework for UAV Communications. arXiv preprint arXiv:2005.06101. 2020. P. 1–12. URL: <https://arxiv.org/abs/2005.06101> (дата зверення: 5.05.2025).

51. Вітрові турбіни або Вітряки. URL: <https://usain.ua/blog/wind-rotors/> (дата зверення: 5.05.2025).

					КВРКІ.022026.22.02.02 ПЗ	Арк. 73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

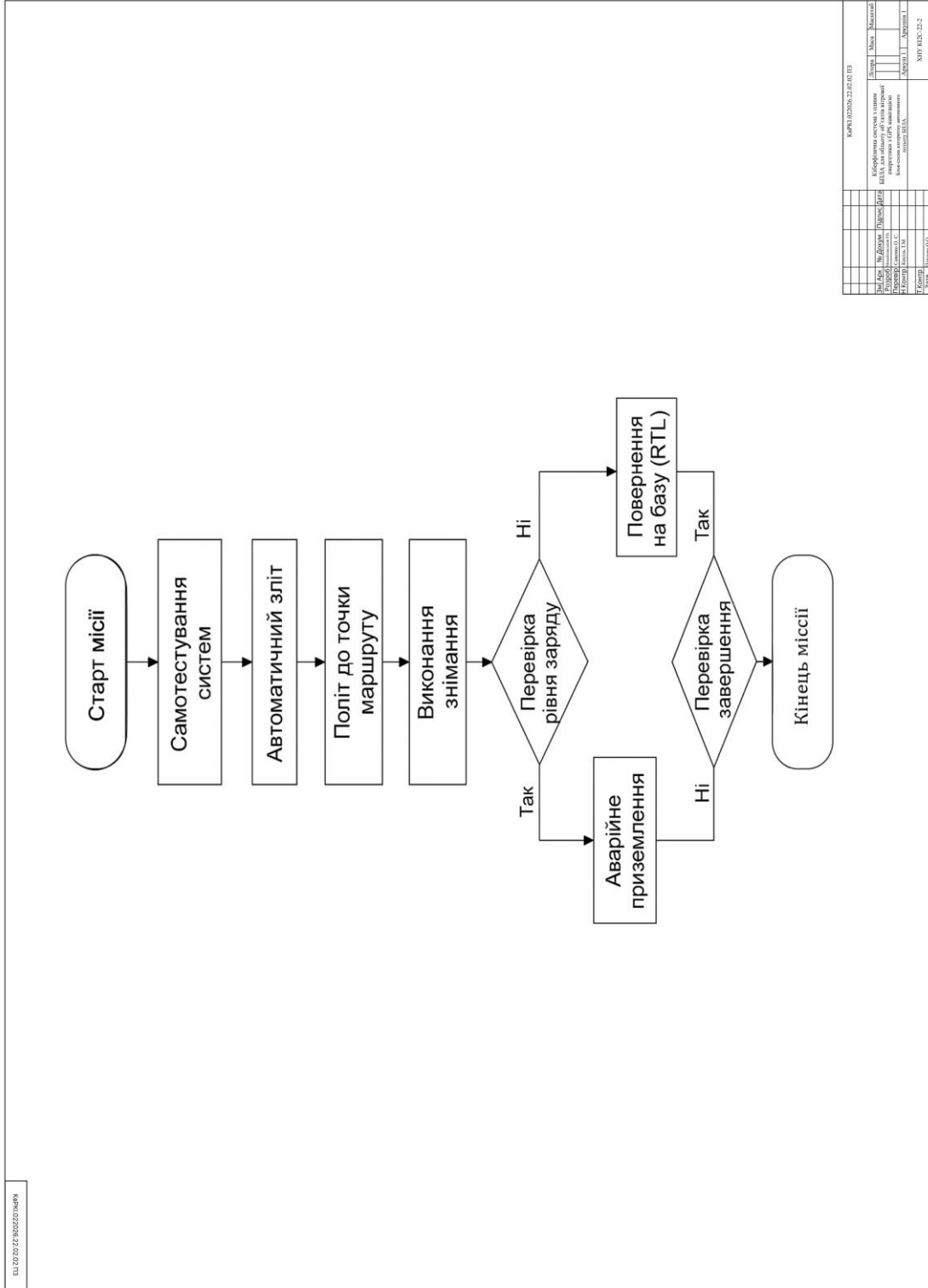
Додаток А (обов'язковий)

КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «ПРИНЦИПОВО-ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ДРОНА»



Додаток Б
(обов'язковий)

КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМУ АВТОНОМНОГО
ПОЛЬОТУ БПЛА»



Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 2.0%

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

ID: 244293 Title: БКР Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією Added in a DB: 2025-06-09 Authors: Ростислав МИХАЙЛОВСЬКИЙ Heads: Олег САВЕНКО Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	118196	811	2594 (2%)	32 (4%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Ростислав МИХАЙЛОВСЬКИЙ

Співавтор:

Назва: Михайловський_Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1:5.9%

Коефіцієнт подібності 2:3.7%

Мікропробіли: 15

Заміна букв: 9

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-09 17:21:05.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

Обґрунтування:

2025-06-09

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Михайловський Ростислав Володимирович

Тема: Кіберфізична система з одним БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 64

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є визначення умов та особливостей застосування безпілотного літального апарата як елемента кіберфізичної системи для інспекції вітрових турбін.

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

3. У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження предметної області, пов'язаної з розробкою кіберфізичних систем із використанням розвідувального БПЛА. Здійснено аналіз сучасних підходів до моніторингу об'єктів за допомогою безпілотних систем, вивчено технічні та програмні компоненти, які можуть застосовуватись у системах автономного збору даних. Розглянуто методи адаптивного керування, особливості побудови архітектур кіберфізичних систем, а також визначено основні вимоги до сенсорної підсистеми. Це заклало міцну теоретичну базу для подальшого проектування системи та обґрунтування її функціональних характеристик.

У другому розділі роботи розроблено архітектуру кіберфізичної системи адаптивного застосування моніторингових елементів. Розглянуто варіанти реалізації каналу зв'язку, обґрунтовано вибір апаратних компонентів, зокрема автопілота, обчислювального модуля, сенсорів та засобів відеофіксації. Також описано підходи до обробки отриманих даних з використанням методів фільтрації, геоприв'язки та попередньої класифікації. Вивчено можливості інтеграції елементів машинного навчання для підвищення точності виявлення об'єктів. Активно застосовано сучасні

інженерні підходи, включаючи побудову адаптивного алгоритму польоту з автоматичною зміною параметрів місії.

У третьому розділі здійснено програмно-апаратну реалізацію прототипу кіберфізичної системи на базі відкритих рішень (ArduPilot/PX4, companion-комп'ютер, ROS). Описано структуру створеного програмного забезпечення, логіку обробки сенсорних даних, процедури автономного запуску місії та реалізовано механізми аварійного реагування. Проведено експериментальні випробування, у яких протестовано точність виконання маршруту, стабільність передачі відео, роботу failsafe-режимів і збір геопросторових даних. Отримані результати підтверджують ефективність реалізованої системи та свідчать про високий ступінь практичного втілення сучасних досягнень у сфері безпілотних технологій і кіберфізичних систем.

4. Позитивні сторони роботи: Робота відзначається високим рівнем практичної реалізації та використанням сучасних технологій. Успішно створено прототип кіберфізичної системи з підтримкою мультиспектральної обробки даних, елементами глибокого навчання та автономного виконання місій.

5. Негативні сторони роботи: Недостатньо розкрито обґрунтування вибору саме такого типу архітектури кіберфізичної системи. Аспекти забезпечення кібербезпеки, зокрема захисту каналів зв'язку та безпеки даних, залишилися поза межами дослідження..

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

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

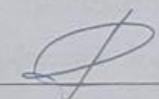
8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: добре

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

*Олександр Олександрович Григорівський, к. тех. наук,
доцент каф. ІІІЗ, УКУ*

“ 12 ” 66 2025 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри КПС
д-р. філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ
Ростислав Михайловський
ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2с-22-2

ЗАЯВА

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

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

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

08.06 2025 року



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

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

Назва: Кіберфізична система з одним БПЛА для об'єкту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією

Автор: Ростислав МИХАЙЛОВСЬКИЙ

Спеціальність: 123- Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

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

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

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

Підтвердження:

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

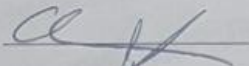


- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з 10-40 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 5.9%; та системою Anti-Plagiarism складає 0.4%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС

Олег САВЕНКО

Андрій Нічепорук

Ольга ПАВЛОВА