

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

Кіберфізична система з декількома БПЛА для об'єкту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією

Назва теми

КвРКІ 022003.22.01.04 ПЗ

Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

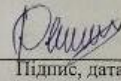
Назва

Виконав: студент III курсу, група KI2c-22-1


Підпис

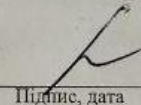
Віталій БУТРИМ
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

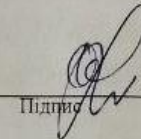
Дмитро МЕДЗАТИЙ
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

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


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

« 10 » 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

Віталіно БУГРИМУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

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

Керівник проекту (роботи) Дмитро МЕДЗАТИЙ, к.т.н., доцент

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) _____

Огляд існуючих рішень та постановка задачі

Проектування кіберфізичної системи з декількома БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи з декількома БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією

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

Архітектура кіберфізичної системи з декількома БПЛА

Результати функціонування кіберфізичної системи

Результати роботи кіберфізичної системи

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2025	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проектування кіберфізичної системи з декількома БПЛА для об'єкту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – проектування кіберфізичної системи з декількома БПЛА для об'єкту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією	29.04.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2025	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Підпис

Віталій БУГРИМ
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Дмитро МЕДЗАТИЙ
Ініціали, прізвище

№ р я д к а	Ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л - л и с т і в	№ ек з	П р и м і т к а
			<u>Текстові документи</u>			
1		КвРКІ 22003.22.01.04ПЗ	Пояснювальна записка	60		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КвРКІ 22003.22.01.04Е8	Архітектура кіберфізичної системи з декількома БПЛА	1		
3		КвРКІ 22003.22.01.04Е8	Результати функціонування кіберфізичної системи	1		
4		КвРКІ 22003.22.01.04Е8	Результати роботи кіберфізичної системи	1		
КвРКІ 022003.22.01.04 ВП						
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		
Розробив		Бугрим		9.06.25	Літера	Аркуш
Перевір.		Медзатий		9.02.25	У	1
Н. контр.		Кисіль		09.06.25	ХНУ, КІ2с-22-1	
Затв.		Павлова		10.06.25		
Відомість проекту						

АНОТАЦІЯ

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

Автор роботи: Віталій БУГРИМ.

Керівник роботи: Дмитро МЕДЗАТИЙ.

Пояснювальна записка: 60 с., 9 рис., 8 табл., 3 дод., 55 джерел.

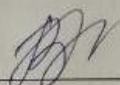
Графічна частина: 3 креслення.

ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА, БПЛА, GPS-НАВІГАЦІЯ, МАРШРУТ, ДЕФЕКТИ, ПОШКОДЖЕННЯ.

Метою роботи є автоматизація технічного моніторингу вітрових турбін з можливістю збору, передачі та обробки діагностичних даних шляхом розроблення кіберфізичної системи, заснованої на взаємодії декількох автономних БПЛА з GPS-навігацією.

Об'єктом дослідження є процес технічного моніторингу та інспекції об'єктів вітрової енергетики, зокрема, конструктивних елементів вітрових турбін.

Предметом дослідження є алгоритмічні, апаратні та програмні засоби організації кіберфізичної системи з кількох безпілотних літальних апаратів для автономного обльоту об'єктів вітроенергетики з точним позиціонуванням та подальшою обробкою отриманих даних.



Підпис студента

30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ	5
1.1 Основні поняття та визначення	5
1.2 Основні сфери застосування безпілотних літальних апаратів	9
1.3 Роль GPS-навігації в кіберфізичних системах з використанням безпілотних літальних апаратів	13
1.4 Висновки до першого розділу.....	19
2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ З ДЕКІЛЬКОМА БПЛА ДЛЯ ОБ'ЇЗУ ОБ'ЄКТІВ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	20
2.1 Особливості об'єктів вітрової енергетики.....	20
2.2 Основні типи даних, що збираються БПЛА з об'єктів вітрової енергетики.....	23
2.3 Методи обробки даних, зібраних БПЛА під час об'їзду об'єктів вітрової енергетики	26
2.4 Архітектура кіберфізичної системи з декількох БПЛА для об'їзду об'єктів вітрової енергетики.....	30
2.5 Висновки до другого розділу	39
3 ПРОГРАМНО-АПАРATНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ	41
3.1 Опис реалізації модулів апаратного та програмного забезпечення.....	41
3.2 Алгоритм планування маршруту для кіберфізичної системи з декількома БПЛА	51
3.3 Висновки до третього розділу.....	62
ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	67
ДОДАТОК А	73
ДОДАТОК Б	74
ДОДАТОК В	75

				КвРКІ. 022003.22.01.04 ПЗ			
Зм. Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Кіберфізична система з декількома БПЛА для об'їзду об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією	Літера	Аркшп	Аркшпів
Виконав	Віталій БУГРИМ	<i>[підпис]</i>	09.06.25		у	2	79
Перевір.	Дмитро МЕДЗАТИЙ	<i>[підпис]</i>	09.06.25	Пояснювальна записка	ХНУ КІ2с-22-1		
Н.контр.	Тетяна КИСІЛЬ	<i>[підпис]</i>	09.06.25				
Затвер.	Ольга ПАВЛОВА	<i>[підпис]</i>	09.06.25				

ВСТУП

У сучасних умовах глобального енергетичного переходу, вітрова енергетика стала ключовою складовою сталого розвитку. Зі зростанням кількості вітрових електростанцій, постає необхідність у забезпеченні їх стабільної та безпечної експлуатації. Одним із критичних аспектів є регулярний технічний контроль та моніторинг стану вітрових турбін, зокрема їхніх лопатей, щогл та редукторних вузлів. Традиційні методи інспекції трудомісткі, ризиковані для персоналу, дороговартісні та часто неефективні з точки зору виявлення ранніх ознак пошкоджень.

На сьогоднішній день набувають популярності кіберфізичні системи, які об'єднують обчислювальні алгоритми, сенсори, автономні платформи та засоби зв'язку в єдину інтелектуальну екосистему. Зокрема, застосування безпілотних літальних апаратів із GPS-навігацією та автономним управлінням дозволяє автоматизувати процес обльоту турбін, фіксувати пошкодження з повітря, формувати 3D-моделі об'єктів та передавати дані для подальшого аналізу. Особливу ефективність демонструють мультиагентні системи БПЛА, що працюють узгоджено у складі розподіленої платформи з можливістю адаптивного планування маршрутів і обміну інформацією.

Розробка та впровадження систем автономної інспекції об'єктів вітрової енергетики є вкрай актуальним завданням у контексті розвитку відновлюваних джерел енергії, цифровізації виробничих процесів та зниження витрат на технічне обслуговування. Використання групи БПЛА у межах кіберфізичної системи дозволяє істотно скоротити час на обстеження об'єктів, зменшити вплив людського чинника та підвищити точність і якість зібраних даних. Актуальність також обумовлена потребою в безпечному обслуговуванні важкодоступних ділянок вітрових турбін, де ручна інспекція ускладнена або неможлива.

Метою роботи є автоматизація технічного моніторингу вітрових турбін з можливістю збору, передачі та обробки діагностичних даних шляхом розроблення

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кіберфізичної системи, заснованої на взаємодії декількох автономних БПЛА з GPS-навігацією.

Об'єктом дослідження є процес технічного моніторингу та інспекції об'єктів вітрової енергетики, зокрема, конструктивних елементів вітрових турбін.

Предметом дослідження є алгоритмічні, апаратні та програмні засоби організації кіберфізичної системи з кількох безпілотних літальних апаратів для автономного обльоту об'єктів вітроенергетики з точним позиціонуванням та подальшою обробкою отриманих даних.

Розроблена система має практичне значення для автоматизації обльоту та інспекції вітрових турбін із використанням точного позиціонування та автономного планування маршрутів. Це дозволяє зменшити час і витрати на технічне обслуговування, підвищуючи безпеку персоналу. Отримані дані можуть застосовуватись для виявлення дефектів, створення 3D-моделей і планування профілактичного ремонту.

Проведені дослідження свідчать про перспективність запропонованої системи, як для регулярного моніторингу, так і для швидкого виявлення несправностей на об'єктах альтернативної енергетики. Надалі можлива інтеграція з цифровими платформами обліку та прогнозування стану обладнання для побудови повноцінної інтелектуальної інспекційної інфраструктури.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ

1.1 Основні поняття та визначення

Кіберфізична система (КФС) утворює систему систем через мережеве з'єднання за допомогою ряду датчиків, виконавчих механізмів та пристроїв управління [1]. За допомогою цієї системи інформація про реальний світ отримується та аналізується, а оброблені результати знову застосовуються до фізичного світу через систему виконавчих механізмів. Ця парадигма відрізняється від традиційних простих систем управління тим, що є двонаправленою системою, яка тісно взаємодіє з реальним світом.

У реальному світі, в якому ми живемо, існує соціальна інфраструктура, така як транспортні системи, будівлі, будинки, електроніка, електричні мережі та Інтернет, а також роботи в реальному просторі. Система, що охоплює такі об'єкти реального світу, називається фізичною системою.

Кіберпростір – це сукупність віртуальних обчислювальних просторів, створених комп'ютерами та Інтернетом, які виконують операції з управління сенсорними вузлами фізичної системи [2].

Кіберфізична система виконує функцію моніторингу навколишнього середовища за допомогою різних датчиків, які можуть виявляти зміни, що відбуваються в реальному світі. Фізична система розпізнає, аналізує та прогнозує явища реального світу на основі інформації, отриманої від датчиків. Отримана інформація про управління застосовується як вхідні дані для системи реального світу, яка трансформує систему реального світу в бажаному напрямку, наприклад, автомобіль з автопілотом, що рухається до пункту призначення.

Різні електронні прилади, побутова техніка, комунікаційні пристрої, автомобілі, тощо, що використовуються переважно в повсякденному житті, оснащені спеціалізованими комп'ютерами.

Спеціальна вбудована система, що виконує функцію мозку пристроїв, називається вбудованою системою [3]. Вбудовані системи, такі як смартфони,

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

MP3-плеєри, камери, навігаційні системи та пожежні сповіщувачі, легко можна зустріти в нашому повсякденному житті (таблиця 1.1). Ці системи, що характеризуються обробкою даних у реальному часі, мініатюризацією та низьким енергоспоживанням, працюють незалежно для досягнення конкретних цілей без взаємодії з іншими системами.

Таблиця 1.1 – Порівняння КФС та вбудованої системи

	КФС	Вбудована система
Компоненти	Кіберсистема, фізична система, мережа, датчик і привід, підключені до реального життя	Апаратне та програмне забезпечення, що належить до кіберсистеми, датчики та приводи, підключені до кіберпростору
Приклад продукту	Автомобіль з автопілотом	Подушка безпеки, hi-pass на швидкісній автомагістралі
Основні застосування	Розумний дім, розумне місто, розумна фабрика, розумна енергомережа	Застосування обмежене в певних продуктах
Зв'язок з фізичною системою	Так, інтеграція з фізичним світом (офлайн-ресурси) в режимі реального часу	Не враховується підключення до фізичної системи. Враховується одиночна змінна, що стосується апаратного забезпечення.
Обробка в режимі реального часу	Так, фізична система працює відповідно до переходу в режимі реального часу	Працює відповідно до бінарного логічного потоку єдиної змінної, що використовується в апаратному забезпеченні.

Кінець таблиці 1.1

	КФС	Вбудована система
Зворотний зв'язок між змінними	Зосередженість на динамічних причинно-наслідкових зв'язках між змінними, що характеризуються взаємозалежністю, взаємною взаємодією, інформаційним зворотним зв'язком та циклічною причинно-наслідковою дією	Не враховується причинно-наслідковий зв'язок між змінними
		Зосередженість на статичному стані
		Вузкий та односторонній підхід до окремого обладнання

Електронні пристрої, оснащені вбудованими системами, можна розглядати як односпрямовані та закриті фізичні системи, оскільки вони працюють відповідно до вимог користувача. Ці традиційні вбудовані системи не враховують зміни в загальній системі під час керування фізичною системою відповідно до роботи програмного забезпечення.

У випадку КФС стан системи змінюється залежно від взаємодії з навколишнім середовищем, часом та людьми. Вбудована система виконує лише просте лінійне завдання, не враховуючи комплексно наслідки цих факторів. Вона реалізує просте односпрямоване управління від кіберсвіту до фізичного світу. З розвитком теорії управління та систем, вбудована система почала еволюціонувати у форму, в якій можна було б активувати двосторонній зв'язок з людьми

В результаті з'явилася кіберфізична система, як нова парадигма, що охоплює фізичні об'єкти в реальному світі, що є розширенням концепції вбудованих систем [4].

Щоб комплексно розглянути кібер- та фізичні системи, спочатку необхідно зрозуміти внутрішні відмінності між цими двома системами.

Фізична система змінюється залежно від часу та простору, тоді як існуюча вбудована система працює залежно від логіки. Оскільки самокерований автомобіль коригує маршрут руху та швидкість руху відповідно до часу та дорожніх умов, так і стан КФС змінюється відповідно до коливань часу та простору.

З іншого боку, у випадку кіберсистеми, результат роботи програмного забезпечення змінюється відповідно до логічного потоку, що вимагає механічних обчислень для роботи відповідного апаратного забезпечення.

Оскільки принципи роботи цих двох систем (КФС та вбудована система) принципово відрізняються один від одного, у випадку кібервбудованої системи необхідний засіб синхронізації для належної взаємодії між цими двома системами.

КФС активно використовуються наразі в світі. Наприклад, у США було запропоновано сім ключових областей застосування КФС: розумна фабрика, розумна транспортна система, розумна енергосистема, розумна система охорони здоров'я, розумна система для дому/будівлі, розумна система оборони та розумна система реагування на надзвичайні ситуації [5]. Наприклад, датчики, встановлені на дорогах, будівлях і мостах, надають основну інформацію про 3D-карту об'єкта.

Таким чином, очікується, що КФС значно покращать ефективність та продуктивність у різних сферах, таких як точне землеробство, управління будівлями, реагування на надзвичайні ситуації, енергетика, виробництво та промисловість, соціальна інфраструктура тощо. Можна сказати, що платформа КФС є платформою на платформі, що складається з декількох невеликих матеріальних або нематеріальних платформ. Зокрема, від технології КФС очікується, що вона забезпечить безвідмовну інтелектуальну систему, яка зможе гарантувати високу надійність та безпеку для гнучкого реагування на несподівані кризові ситуації. Очікується, що багато додатків, що працюють на базі КФС, створять додаткову цінність у кожному секторі суспільства та призведуть до каскадного розвитку нових бізнес-моделей.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Основні сфери застосування безпілотних літальних апаратів

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – це авіаційна платформа, що виконує політ без пілота на борту, під дистанційним або автономним керуванням. Зазвичай є частиною більшої системи, безпілотної авіаційної системи (БАС/UAS), яка включає наземну станцію управління, телеметрію, зв'язок, обробку даних, програмне забезпечення та інші елементи.

До основних компонентів БПЛА відносяться наступні:

- літальна платформа (мультикоптер, літак, гібрид);
- система керування польотом (автопілот);
- GPS/INS модулі для навігації;
- платформа корисного навантаження (камери, сенсори, LIDAR);
- системи зв'язку (радіомодулі, LTE, Wi-Fi);
- електроживлення (акумулятори, генератори);
- наземна станція (GCS) з програмним забезпеченням.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) останнім часом швидко розвиваються, що сприяє появі широкого спектру інноваційних застосувань, які можуть кардинально змінити підхід до проектування кіберфізичних систем.

КФС – це сучасне покоління систем із синергетичною взаємодією між обчислювальним і фізичним потенціалом, які можуть взаємодіяти з людьми за допомогою кількох нових механізмів. Основними перевагами використання БПЛА в кіберфізичних системах є їхні виняткові характеристики, зокрема мобільність, динамічність, легкість розгортання, адаптивна висота, маневреність, можливість налаштування та ефективна оцінка реальних функцій у будь-який час і в будь-якому місці.

Крім того, з технологічної точки зору, БПЛА, як передбачається, стануть важливим елементом розвитку передових кіберфізичних систем.

Сьогодні безпілотні літальні апарати стали не просто технологічною новинкою, а повноцінним інструментом у багатьох сферах людської діяльності.

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Класифікація безпілотних літальних апаратів наведена на рисунку 1.1.

БПЛА



Рисунок 1.1 – Класифікація безпілотних літальних апаратів

Їхня популярність обумовлена комбінацією маневреності, можливості польоту в небезпечних або важкодоступних місцях, точності спостереження та здатності автономної роботи. Залежно від конфігурації платформи, типів сенсорів та програмного забезпечення, БПЛА ефективно застосовуються в десятках галузей від оборони до сільського господарства.

Однією з найважливіших галузей є військова та оборонна сфера, де дрони виконують широкий спектр завдань: розвідка, коригування вогню, доставка вантажів, радіоелектронна боротьба, удари по цілях [6]. Особливо активно використовуються БПЛА малого радіуса дії та квадрокоптери з FPV-системами. Основними перевагами є зменшення ризику для особового складу та можливість точного виявлення цілей в реальному часі. Водночас виклики полягають у боротьбі з засобами радіоелектронної протидії та розвитком антидронових систем.

У сільському господарстві БПЛА стали справжнім проривом для точного землеробства. Вони застосовуються для моніторингу стану посівів, вимірювання вегетаційних індексів (NDVI), виявлення зон посухи чи захворювань, картографування полів, а також для внесення добрив або насіння [7]. Агрономи можуть приймати рішення на основі даних, зібраних із повітря, що значно знижує витрати й підвищує врожайність. Безпілотники з мультиспектральними камерами, тепловізорами та GNSS-модулями є основою цієї цифрової трансформації.

У будівництві та інфраструктурному моніторингу БПЛА використовуються для обстеження мостів, дахів, ліній електропередач, трубопроводів та дорожніх об'єктів [8]. Завдяки здатності створювати точні 3D-моделі об'єктів та виявляти мікропошкодження, дрони дозволяють зменшити витрати на інспекції та уникнути небезпеки для людей. Крім того, у великих проєктах застосовують дрони для моніторингу темпів виконання робіт, контролю за логістикою та ведення цифрових щоденників будівництва.

Сфера енергетики також активно інтегрує безпілотні системи. Вітрові турбіни, сонячні електростанції, високовольтні лінії, трансформаторні підстанції, всі ці об'єкти потребують регулярного огляду [9]. БПЛА з термокамерами,

лідаром або зум-оптикою дозволяють виявляти перегрів, короткі замикання, механічні дефекти без необхідності відключення об'єкта. У сфері вітрової енергетики дрони використовують для аналізу стану лопатей, а в сонячній використовуються для виявлення пошкоджених панелей.

У екології та охороні довкілля БПЛА застосовуються для контролю стану лісів, вимірювання площі вирубок, виявлення пожеж, моніторингу водойм, берегів та зміни ландшафтів [10]. Завдяки високій точності зйомки можна оперативно відстежувати зміни у флорі, фауні, ґрунтах, а також оцінювати наслідки стихійних лих. У національних парках дрони також допомагають в охороні тварин і виявленні браконьєрства.

Археологія та культурна спадщина є ще однією важливою сферою. Дрони використовуються для вивчення ландшафтів, виявлення прихованих структур під землею за допомогою мультиспектральної зйомки, створення 3D-реконструкцій об'єктів [11]. Це дозволяє зберігати та документувати культурні пам'ятки без фізичного втручання.

У сфері логістики та доставки БПЛА вже тестуються як альтернатива кур'єрам. Доставка медичних препаратів, органів для трансплантації, проб води в небезпечні зони, термінових вантажів у важкодоступні райони – це приклади використання дронів, які відкривають нову еру автономного транспорту [12].

Пошуково-рятувальні операції виграють від дронів, завдяки можливості швидко обстежити велику територію, виявити постраждалих або джерело загрози. З ІЧ-камерами дрони можуть виявляти теплові сліди вночі, а завдяки гучномовцям передавати команди чи вказівки рятувальним групам [13].

У міському управлінні та інтелектуальних містах дрони забезпечують відеонагляд, аналіз трафіку, перевірку дахів, контроль стихійної забудови, облік зелених зон та моніторинг стану доріг. Вони допомагають автоматизувати інвентаризацію ресурсів міста та забезпечити прозорість інфраструктурних процесів [14].

Зрештою, сфера науки та досліджень охоплює використання дронів у

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гідрології, метеорології, геології, біології, океанографії. Наприклад, БПЛА використовують для вимірювання температури поверхні океану, спостереження за міграцією тварин, збору проб атмосфери або вивчення сейсмічних структур [15].

Таким чином, безпілотники стають багатофункціональним інструментом, який об'єднує сенсори, штучний інтелект, автоматизацію та гнучкість. Розвиток програмного забезпечення, енергоефективних акумуляторів та мережі 5G сприяє ще глибшій інтеграції БПЛА у всі сфери сучасного суспільства.

1.3 Роль GPS-навігації в кіберфізичних системах з використанням безпілотних літальних апаратів

GPS-навігація є ключовим елементом у функціонуванні багатокомпонентної кіберфізичної системи, що включає декілька БПЛА, які здійснюють моніторинг та інспекцію об'єктів вітрової енергетики. У такій системі Global Positioning System (або її альтернативи Galileo, ГЛОНАСС, BeiDou) виконує не лише роль засобу позиціонування, а й служить базою для координованого планування маршрутів, визначення зон інтересу, синхронізації дій між БПЛА, а також геоприв'язки зібраних даних до цифрових карт об'єкта.

У разі вітрових турбін розташування часто є віддаленим, з обмеженою видимістю та інфраструктурою. БПЛА, оснащені GNSS-приймачами з підтримкою диференційного режиму (RTK або PPK), здатні забезпечити точність до сантиметрів, що критично важливо для обльоту навколо довгих і високих конструкцій, таких як лопаті турбін. Звичайний GPS із точністю 1–3 метри не дозволяє виконувати прецизійне обльотне сканування лопатей чи огляд вузлів кріплення без ризику зіткнення або втрати фокусної відстані для сенсорів. Тому в таких завданнях часто використовують RTK-базові станції або мережеві служби, які передають корекційні дані на дрон у реальному часі.

Ще одним важливим аспектом GPS-навігації є підтримка автономної навігації за маршрутами. Попередньо складені місії (waypoint missions) завантажуються до автопілота кожного дрона, і завдяки координатній системі

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

БПЛА можуть слідувати заданим траєкторіям із гарантованим дотриманням безпечної дистанції між собою, розділенням по висотах або по сегментах вітротурбіни. Це дозволяє зменшити кількість необхідних операторів, а в деяких випадках навіть забезпечити повністю автономний обліт усієї вітроелектростанції.

Крім того, GPS забезпечує просторову синхронізацію даних.

Усі зібрані зображення, відео, теплові карти чи хмари точок мають координатний «відбиток», що дозволяє поєднувати їх у GIS-системах, будувати цифрові моделі (Digital Twin), фіксувати місця пошкоджень або дефектів і спостерігати їхній розвиток у динаміці.

У складніших умовах, наприклад, під час обльоту щільно розташованих вітротурбін у гірських або морських регіонах, використання тільки GPS може бути недостатнім. У таких випадках застосовуються гібридні навігаційні системи, які поєднують GPS з візуальною одометрією, інерційними модулями (IMU), SLAM-алгоритмами (Simultaneous Localization and Mapping) або навіть LiDAR-навігацією. Це забезпечує надійну навігацію в умовах часткової втрати сигналу (наприклад, поблизу металевих конструкцій, щогл, у вузьких проходах тощо) [15].

GPS – основа для кооперативної роботи групи БПЛА. У мультидроновій системі, коли декілька апаратів одночасно облітають окремі частини одного чи кількох об'єктів, знання точної позиції кожного дрона в глобальній системі координат дозволяє уникнути конфліктів маршрутів, синхронізувати збір даних і динамічно перебудовувати завдання у разі відмови одного з апаратів.

Опис GPS-протоколів і суміжних технологій є важливою частиною для розуміння того, як саме БПЛА отримують, передають і використовують навігаційні дані в кіберфізичних системах.

У системах GPS-навігації протоколами називають формати передачі даних між GPS-приймачами та обчислювальними пристроями (автопілотом, мікроконтролером, польотним контролером). Протоколи забезпечують декодування інформації про місцезнаходження, швидкість, висоту, точність позиціонування, стан супутників та час.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У системах з БПЛА, ці протоколи критично важливі для забезпечення стабільної навігації, автоматичних місій, збору геоприв'язаних даних та координації між апаратами.

Найпоширенішим протоколом є NMEA 0183 (National Marine Electronics Association), який є текстовим, відкритим і підтримується більшістю навігаційних модулів [16]. Він передає дані у вигляді серії ASCII-рядків (так званих «речень»), які оновлюються з частотою 1–10 Гц.

Найбільш важливі NMEA-речення включають:

- \$GPGGA – глобальні координати, висота, точність;
- \$GPRMC – мінімальні навігаційні дані: координати, швидкість, час;
- \$GPGSV – інформація про видимі супутники;
- \$GPGSA – статус навігаційного рішення та кількість супутників.

NMEA дуже простий і сумісний з UART-портами більшості мікроконтролерів (наприклад, STM32 або ATmega), але не дуже ефективний в обсязі і має обмежену швидкість.

Іншим розповсюдженим протоколом, зокрема в продукції u-blox, є UBX (u-blox Binary Protocol) [17]. Це бінарний протокол, який дозволяє передавати набагато більші обсяги даних, з вищою частотою (до 20 Гц), меншими затримками та кращою ефективністю. UBX також підтримує керування конфігурацією приймача (вибір супутникових систем, фільтрація шуму, налаштування частоти повідомлень тощо).

Для інтеграції з автопілотами типу ArduPilot, PX4, Pixhawk та аналогами застосовуються внутрішні протоколи навігаційного підсистемного обміну. Наприклад, у Pixhawk навігаційний модуль підключається до порту GPS і передає дані через MAVLink більш складний протокол, який дозволяє не лише приймати координати, але й керувати параметрами місій, телеметрією та зворотним зв'язком з земної станції [18].

Окрім базових GPS-протоколів, важливу роль відіграють технології корекції та уточнення позиціонування. Розглянемо більш детально.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

RTK (Real-Time Kinematic) – високоточна технологія GPS, яка базується на обміні фазовою інформацією між базовою станцією (яка знає своє точне положення) та рухомим об'єктом (дрон) [19]. Базова станція передає корекційні дані в реальному часі через спеціальні протоколи (наприклад, RTCM 3.x), які дрон приймає і враховує в обчисленнях. Перевагою RTK є точність до 1–2 см. Недоліком є потреба у стабільному радіоканалі або LTE-зв'язку.

PPK (Post-Processed Kinematic) – альтернативний метод, де дані GPS логуються як на базовій, так і на рухомій платформі, після чого синхронізуються та обробляються офлайн для підвищення точності [20]. Метод точний і не залежить від стабільного зв'язку, але непридатний для реального часу.

SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems), такі як WAAS (США), EGNOS (ЄС), MSAS (Японія) надають загальнодоступні корекційні сигнали, які покращують точність GPS до 1–2 метрів, але недостатні для задач високоточної інспекції [21].

DGPS (Differential GPS) більш рання технологія, яка використовувала наземні радіопередавачі для корекції, але зараз майже витіснена RTK і SBAS.

У професійних рішеннях, дрони використовують інтегровані навігаційні модулі, які поєднують GPS з IMU (інерційною системою), барометром та іноді магнітометром.

Такі комплекси працюють на принципах фільтра Калмана, тобто алгоритму адаптивної фільтрації даних з різних сенсорів для точного обчислення положення в умовах шуму, втрат сигналу або різких маневрів.

У перспективі, для автономного позиціонування в умовах поганої видимості супутників (наприклад, у горах, біля вітряків, в промислових зонах) активно досліджується інтеграція SLAM, LiDAR-навігації, RTLS-систем, а також використання VIO (Visual-Inertial Odometry) методів навігації на базі відео з камери.

Узагальнена інформація по GPS-протоколах та навігаційних технологіях для БПЛА наведена в таблиці 1.2.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Інформація по GPS-протоколах та навігаційних технологіях для БПЛА

Категорія	Протокол	Тип передачі	Точність	Переваги	Недоліки	Приклади модулів
Базовий протокол	NMEA 0183	ASCII (текстовий)	~2–5 м	Простий, універсальний	Повільний, неефективний	u-blox M8N, Quectel L89
Бінарний протокол	UBX (u-blox)	Бінарний	~2 м	Ефективний, швидкий, гнучкий	Прив'язка до u-blox	u-blox M8P, ZED-F9P
Стандартизований обмін	RTCM 2.x / 3.x	Бінарний	<1 см (RTK)	Стандарт корекційних даних	Потрібна базова станція	u-blox F9P, Trimble, Emlid Reach
Корекція GPS	RTK Real-Time Kinematic	Бінарний (через RTCM)	~1–2 см	Найточніша в реальному часі	Залежить від зв'язку	u-blox ZED-F9P, Emlid Reach M2
Постобробка	PPK (Post-Processed)	Файлова (лог)	<1 см (офлайн)	Висока точність без зв'язку	Затримка, не реальний час	Reach RS2, M+
Авгментація	SBAS (WAAS, EGNOS)	Радіосигнал з супутників	~1–2 м	Безкоштовна, проста	Недостатня точність	Підтримується більшістю модулів

Кінець таблиці 1.2

Категорія	Протокол	Тип передачі	Точність	Переваги	Недоліки	Приклади модулів
Інші формати	GPX, RINEX	Лог-файли	~1–10 м	Використання в GIS, аналіз	Не для реального часу	Вивід із GPS-логерів

NMEA 0183 – найпростіший та найбільш поширений текстовий протокол для навігаційних пристроїв. Його підтримують усі дешеві модулі. Підходить для нескладних задач, коли немає вимог до високої швидкості або точності. Але неефективний для багатопараметричних місій.

UBX – власний протокол компанії u-blox, підтримує налаштування всіх параметрів модуля, має менше затримок, гнучкий, підходить для професійних дронів. Дозволяє високочастотне оновлення координат (до 20 Гц) і більш точне позиціонування.

RTCM – це стандарт передачі корекційних сигналів у режимі RTK. Він дозволяє поєднати GPS з наземною базовою станцією для досягнення сантиметрової точності. Застосовується для високоточної зйомки, інспекцій, 3D-реконструкції.

MAVLink – спеціалізований протокол для комунікації між автопілотом дрона та зовнішніми системами (наземна станція, телеметрія, GPS-модулі). Підтримує маршрути, навігацію, командне управління, передачу зображень.

RTK забезпечує реальне уточнення координат на основі фазової інформації з базової станції. Вимагає стабільного радіозв'язку або використання мережі (через NTRIP-протокол). Найточніший режим, але складний у реалізації.

PPK – альтернатива RTK, де логування даних відбувається в польоті, а обробка після приземлення. Підходить для створення геоприв'язаних моделей, коли реальний час не критичний.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

SBAS дає корекції через супутники, не потребує додаткових пристроїв, але рівень точності обмежений. Підходить для навігації, але не для інспекцій об'єктів.

GPX / RINEX – формати логів координат (GPX для маршрутів, RINEX для наукових GPS-досліджень), що використовуються для офлайн-обробки, аналізу та картографії.

1.4 Висновки до першого розділу

У межах розділу 1 було визначено основні поняття кіберфізичних систем, проведено огляд класифікації та характеристик безпілотних літальних апаратів, що дало змогу зрозуміти їх функціональні можливості, а також дізнатись про роль БПЛА як ключових компонентів сучасних кіберфізичних систем. Основна увага була зосереджена на тому, як параметри БПЛА впливають на архітектуру, логіку дій та ефективність у конкретних застосуваннях, зокрема в контексті автоматизованих, геопросторово-орієнтованих задач.

Розглянута класифікація продемонструвала, що кожен тип БПЛА відіграє свою роль у побудові кіберфізичних систем. Також було розглянуто навігаційні можливості БПЛА, зокрема використання GPS та GNSS у поєднанні з INS для формування точного, стабільного позиціонування, що є критично важливим для кіберфізичних систем. За результатами дослідження встановлено, що застосування високоточних протоколів, таких як RTK та PPK, дозволяє не лише точно слідувати маршрутам, а й інтегрувати отримані координати в обчислювальні ядра систем управління, з можливістю зворотного аналізу та адаптації.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ З ДЕКІЛЬКОМА БПЛА ДЛЯ ОБ'ЇОТУ ОБ'ЄКТІВ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

2.1 Особливості об'єктів вітрової енергетики

Об'єкти вітрової енергетики – це інфраструктурні елементи, призначені для перетворення кінетичної енергії вітру в електричну енергію, до складу яких входять вітрові турбіни, опорні вежі, лопаті, енергетичні модулі, а також допоміжні елементи (сенсори, трансформатори, кабельні канали).

У контексті об'їоту БПЛА, ці об'єкти розглядаються як складні тривимірні цілі з обмеженим доступом і підвищеними вимогами до точності навігації та збору даних.

Об'єкти вітрової енергетики становлять собою складні технічні системи, призначені для захоплення та перетворення енергії вітру в електричну енергію. Основними функціональними складовими таких об'єктів є вітрові турбіни, які зазвичай мають горизонтальну або вертикальну вісь обертання, опорні конструкції у вигляді високих металевих або бетонних веж, роторні лопаті, генератори, трансмісійні системи, а також системи автоматичного регулювання. До допоміжних елементів інфраструктури належать наземні підстанції, кабельні канали, сенсори контролю стану, системи охолодження, системи передачі енергії до загальної мережі, а також засоби захисту та обслуговування.

З погляду аерозйомки та об'їоту за допомогою безпілотних літальних апаратів, об'єкти вітрової енергетики ускладнюються своєю масштабністю, висотністю, рухомими частинами та розташуванням у відкритому або важкодоступному середовищі. Їх висота часто перевищує 100 метрів, що створює особливі вимоги до вертикального позиціонування, стабілізації вітролітального апарата та врахування впливу висотних вітрових потоків. Обертання лопатей є динамічною перешкодою, яка може створювати значні турбулентні зони навколо вежі, впливаючи на траєкторії польоту дронів.

Багато об'єктів розташовано на відкритих ділянках, а саме рівнинах,

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пагорбах, узбережжях або морських платформах, що додає складності в плануванні польотних маршрутів, потребує точного прогнозу погодних умов і врахування локальних кліматичних особливостей.

Крім того, в об'єктів вітрової енергетики часто відсутні чітко виражені візуальні маркери, що ускладнює автоматичну ідентифікацію об'єкта засобами комп'ютерного зору. У щільних полях турбін, де розміщено десятки або сотні однотипних веж, виникає необхідність у точному картографуванні, розпізнаванні конкретних об'єктів і коректному веденні обліку їхнього технічного стану.

Усе це зумовлює потребу в надійній GPS-навігації, високоточному вимірюванні координат, стійкому зв'язку з наземною станцією та здатності БПЛА адаптуватися до мінливих умов середовища в режимі реального часу.

Об'єкти вітрової енергетики, таким чином, є не лише джерелами відновлюваної енергії, а й складними технічними структурами, що потребують спеціалізованих засобів обстеження, включаючи автономні або напіваавтономні безпілотні системи.

Порівняльні характеристики об'єктів вітрової енергетики наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Класифікація об'єктів вітрової енергетики

Клас об'єкта	Тип турбіни	Розташування	Основні характеристики	Складність обльоту
Наземні вежі на рівнинах	Горизонтальна вісь	Відкриті поля	Стандартизовані вежі, помірний вітер	Низька
Наземні вежі на пагорбах	Горизонтальна вісь	Нерівний рельєф	Підвищена турбулентність, кращий вітер	Середня
Узбережні вежі	Горизонтальна вісь	Берегова лінія	Сильні пориви вітру, вологе повітря	Висока

Кінець таблиці 2.1

Клас об'єкта	Тип турбіни	Розташування	Основні характеристики	Складність обльоту
Морські платформи	Горизонтальна вісь	Відкрите море	Висока вологість, нестабільна навігація	Дуже висока
Компактні вертикальні турбіни	Вертикальна вісь	Міські або локальні зони	Невеликі розміри, щільна забудова	Середня / Висока
Мобільні або прототипні модулі	Горизонтальна або вертикальна вісь	Тимчасові стенди	Несталі платформи, часто змінюване розташування	Висока

Наземні вежі на рівнинах – це найпоширеніший тип промислових турбін, які встановлюються на відкритих сільськогосподарських або степових територіях. Через простий рельєф та сталі вітрові умови забезпечується відносна простота обльоту дронами. Низький рівень турбулентності й велика відстань між об'єктами дозволяють будувати оптимальні траєкторії з мінімальними ризиками.

Наземні вежі на пагорбах розташовуються в підвищених місцевостях, де вітрова енергія потужніша, але й більш турбулентна. Рельєф ускладнює автоматичне планування маршруту, особливо при близькому польоті до поверхні. Додатково виникає потреба в компенсуванні висотних перепадів при картографуванні або фотообльоті.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Узбережні вежі встановлюються на суші поблизу моря чи океану. Вони зазнають значного впливу солоного повітря, поривів вітру й зміни мікроклімату. Такі умови ускладнюють стабілізацію дрона й вимагають швидкого збору даних. Крім того, при високій вологості підвищується ризик втрати зв'язку або корозії обладнання.

Морські платформи найбільш складні об'єкти для обльоту. Розміщені далеко в морі, на спеціальних платформах або бетонних опорах, вони абсолютно недоступні для наземного обслуговування. Дрони мають обмежений час польоту через віддаленість і сильну турбулентність. GPS-навігація може страждати від відбиття сигналів над водою, а зліт і посадка часто здійснюються з човнів або автономних барж.

Компактні вертикальні турбіни – це менш потужні турбіни, які часто встановлюються в умовах міської інфраструктури або на дахах. Вони мають іншу конструкцію, з вертикальною віссю обертання та менші розміри. Складність обльоту полягає у близькості до будівель, кабелів, ліхтарів або інших перешкод. Необхідно застосовувати високоточну локальну навігацію, іноді з використанням комп'ютерного зору.

Мобільні або прототипні модулі використовуються для досліджень, випробувань або тимчасових інсталяцій. Мають нестабільне положення, часто змінюване розташування, а іноді й неповну документацію щодо розмірів чи обмежень доступу. Для таких об'єктів планування обльоту виконується індивідуально, з попередньою розвідкою або частковим ручним контролем.

2.2 Основні типи даних, що збираються БПЛА з об'єктів вітрової енергетики

Безпілотні літальні апарати, які залучаються до моніторингу та обльоту об'єктів вітрової енергетики, відіграють ключову роль у зборі високоточних, багатоаспектних даних, що використовуються для технічного обстеження, оцінки

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стану, планування обслуговування та вдосконалення експлуатаційних стратегій.

Завдяки можливості оснащення широким спектром сенсорів та модулів спостереження, сучасні БПЛА здатні здійснювати не лише візуальний контроль, а й вимірювання фізичних, просторових та атмосферних характеристик об'єктів.

Одним із основних типів даних, які збирають дрони, є зображення у видимому спектрі [22]. Ці знімки з високою роздільною здатністю дозволяють виконувати візуальну інспекцію лопатей, вежі, кріплень та інших елементів конструкції. Вони використовуються для виявлення тріщин, корозії, відшарувань фарби або деформацій. Крім того, візуальні дані застосовуються як основа для побудови 3D-моделей за методами фотограмметрії [23].

Ще одним критично важливим типом інформації є термографічні дані, отримані з інфрачервоних камер [24]. Вони дозволяють виявляти перегрів електричних компонентів, генераторів, вузлів з підвищеним тертям або непрацюючих ділянок системи. Використання ІЧ-аналізу особливо важливе для виявлення прихованих дефектів, які не видно у звичайному світлі.

БПЛА також збирають геопросторові дані, такі як GPS-координати, висоти, маршрути обльоту, кути нахилу камер та орієнтацію апарата. Ці дані потрібні для точного картографування, фіксації положення об'єкта в просторі та координації обльоту у складних середовищах, таких як морські платформи або гірська місцевість.

Системи з лідаром дають змогу отримувати тривимірні моделі поверхні об'єкта та навколишнього середовища з сантиметровою точністю [25]. Це забезпечує змогу об'єктивно аналізувати геометрію лопатей, відстані між об'єктами, деформації або відхилення від норми.

Доповненням до технічного моніторингу є збір метеорологічних даних, таких як швидкість вітру, температура, вологість, тиск або напрямок потоків повітря навколо турбіни. Такі показники дозволяють враховувати динамічне навантаження на об'єкт і оцінювати ризики при плануванні обслуговування.

Не менш важливою є фіксація телеметричних даних самого БПЛА, тобто це

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівень заряду, стабільність польоту, навантаження на двигуни, відхилення від маршруту, що дозволяє не тільки контролювати саму місію, а й зберігати надійність виконання обльоту без втрати або пошкодження апарата.

В таблиці 2.2 наведені характеристики основних типів даних, що збираються БПЛА з об'єктів вітрової енергетики.

Таблиця 2.2 – Основні типи даних, що збираються БПЛА з об'єктів вітрової енергетики

Тип даних	Сенсори або модулі	Призначення або приклади використання	Точність / Формат
Візуальні зображення	RGB-камери, фотомодулі	Інспекція лопатей, веж, кріплень, фотограмметрія	До 20 Мп, JPEG/RAW
Інфрачервоні знімки	Тепловізори (IR-камери)	Виявлення перегріву, внутрішніх пошкоджень, несправних модулів	0.05–0.1°C, Radiometric TIFF
GPS-координати	GPS/GLONASS /RTK-модулі	Геоприв'язка даних, маршрути обльоту, побудова карт	До 1 см (RTK), GPX/CSV
Лідарні дані	Лідар-сканери	Створення 3D-моделей, вимірювання відстаней, виявлення деформацій	Точність до 2–5 см, LAS/PLY
Висотні дані	Барометри, GPS	Аналіз висоти конструкції, безпечне позиціонування дрона	До 0.5 м
Метеоумови	Анемометри, гігрометри	Оцінка кліматичних умов під час обльоту, корекція траєкторій	В залежності від сенсора

Кінець таблиці 2.2

Тип даних	Сенсори або модулі	Призначення або приклади використання	Точність / Формат
Телеметрія дрона	Вбудовані системи БПЛА	Стан БПЛА, стабільність польоту, витрати акумулятора, вібрації	Протоколи MAVLink, CSV
Відео в реальному часі	Камери з передачею відео	Онлайн-моніторинг технічного стану об'єкта під час місії	HD/4K, H.264/H.265

Ці дані часто обробляються комбіновано. Наприклад, геоприв'язане термозображення може використовуватися одночасно для аналітики дефектів і формування цифрового акту технічного стану.

Інтеграція різних типів сенсорної інформації – це ключовий фактор точного, безпечного та ефективного моніторингу вітроенергетичних установок із застосуванням БПЛА.

2.3 Методи обробки даних, зібраних БПЛА під час обльоту об'єктів вітрової енергетики

Обробка даних, зібраних БПЛА під час обльоту об'єктів вітрової енергетики, включає комплекс методів, які охоплюють аналіз зображень, геопросторову обробку, тепловий аналіз, побудову тривимірних моделей, виявлення дефектів та прогнозування технічного стану. Залежно від типу даних і цілей моніторингу застосовуються різні алгоритмічні, програмні та машинні підходи. Нижче наведено основні методи обробки даних:

1. Фотограмметрія (Structure from Motion, SfM). Суть методу полягає в побудові 3D-моделей за сукупністю 2D-знімків, зроблених з різних точок з відомою позицією камери.

Перевагами цього методу є те, що він створює детальні цифрові 3D-моделі (Digital Surface Model, DSM) без дорогих сенсорів; може працювати з RGB-зображеннями зі звичайної камери та дає змогу виконувати точні геометричні вимірювання.

До недоліків можна віднести те, що він потребує високої перекриваності кадрів (60–80%); обробка потребує значних обчислювальних ресурсів; вразливість до неоднорідного освітлення та об'єктів без чітких контурів.

2. Обробка інфрачервоних (IR) зображень. Метод полягає в аналізі теплових зображень для виявлення аномалій температури.

До переваг можна віднести те, що він дозволяє виявляти приховані дефекти, такі як, перегріті контакти, фрикційні вузли, короткі замикання; ефективний у ранньому діагностуванні безконтактним способом.

Недоліки полягають в тому, що необхідна радіометрична калібровка камер; метод потребує стабільних зовнішніх умов (час доби, інсоляція) та інтерпретація даних вимагає кваліфікації.

3. Лідарна обробка (LiDAR Point Cloud Processing) полягає в обробці хмар точок, отриманих шляхом лазерного сканування, для відображення точного рельєфу та геометрії конструкцій.

До переваг можна віднести високу точність просторових вимірювань (до сантиметрів); незалежність від освітлення; ідеально підходить для складних геометричних об'єктів (лопати, кріплення, рельєф).

До недоліків можна віднести дороговартісне обладнання; великі обсяги даних (десятки ГБ) та потребу в спеціалізованому ПЗ (наприклад, CloudCompare, LASTools).

4. Класичний комп'ютерний зір (CV) полягає у використанні алгоритмів обробки зображень для виявлення тріщин, плям, відколів, деформацій.

Перевагами є те, що широко підтримується бібліотеками (OpenCV, Scikit-image); можна реалізувати на вбудованих системах; дає змогу реалізовувати специфічні правила виявлення.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліками є слабка узагальнюваність на нові випадки; вразливість до змін умов освітлення та зашумлених даних та потрібна ручна настройка порогів і фільтрів.

5. Машинне навчання / Глибоке навчання (ML / DL) полягає у застосуванні нейронних мереж (CNN, U-Net, YOLO тощо) для автоматичного виявлення дефектів, класифікації частин об'єкта або прогнозування зносу.

Перевагами є автоматичне виявлення складних дефектів із високою точністю; можливість працювати зі злитими датасетами (RGB+IR+GPS); добре масштабується для багатьох об'єктів.

До недоліків можна віднести те, що метод потребує великих наборів розмічених даних; висока вартість навчання моделей; складність інтерпретації результатів.

6. Геопросторова обробка (GIS-аналітика). Використання ГІС-систем для об'єднання всіх даних у просторовій прив'язці: теплових карт, зон ризику, треків обльоту.

Перевагами є інтеграція багатьох джерел у єдину карту; простота візуалізації та прийняття рішень; підтримка масштабного моніторингу (кілька вітропарків).

Недоліками є обмеження у точності в порівнянні з CAD/3D; потреба навичок у ГІС-системах (QGIS, ArcGIS) та часто потребує попередньої обробки інших типів даних.

Порівняння описаних методів наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльна таблиця методів обробки даних

Метод	Тип даних	Основна мета	Переваги	Недоліки
Фотограмметрія (SfM)	Фото	3D-модель, картографія	Низька вартість, висока точність	Повільна обробка, залежність від якості фото

Кінець таблиці 2.3

Метод	Тип даних	Основна мета	Переваги	Недоліки
Термографія	ІЧ-зображення	Діагностика дефектів	Раннє виявлення, безконтактна	Потребує калібрування, складність інтерпретації
Лідар	Хмара точок	Геометричне моделювання	Висока точність, незалежність від освітлення	Дорогі сенсори, складна обробка
Комп'ютерний зір	RGB-зображення	Виявлення дефектів	Простота реалізації, швидкість	Низька адаптивність, потреба в ручних налаштуваннях
Глибоке навчання	Зображення/відео	Автоматичний аналіз	Висока точність, автоматизація	Висока вартість розробки, потреба в дата-сетах
ГІС-аналіз	Геодані, GPS	Просторове планування	Візуалізація, інтеграція даних	Потребує додаткових знань, обмежена деталізація об'єктів

У реальних проєктах зазвичай застосовують гібридний підхід. Комбінують фотограмметрію, комп'ютерний зір, термографію та машинне навчання для досягнення найкращої точності та автоматизації процесів технічного обстеження об'єктів вітрової енергетики.

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Архітектура кіберфізичної системи з декількох БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики

Кіберфізична система, що складається з декількох БПЛА, призначена для автоматизованого обльоту та моніторингу об'єктів вітрової енергетики, зокрема, вітротурбін і вітрових електростанцій. Така система об'єднує фізичні компоненти (дрони, сенсори, комунікаційні модулі) з цифровими технологіями (системи керування, аналіз даних, GPS-навігацію, алгоритми обльоту) в єдину інтегровану платформу (рисунок 2.1).

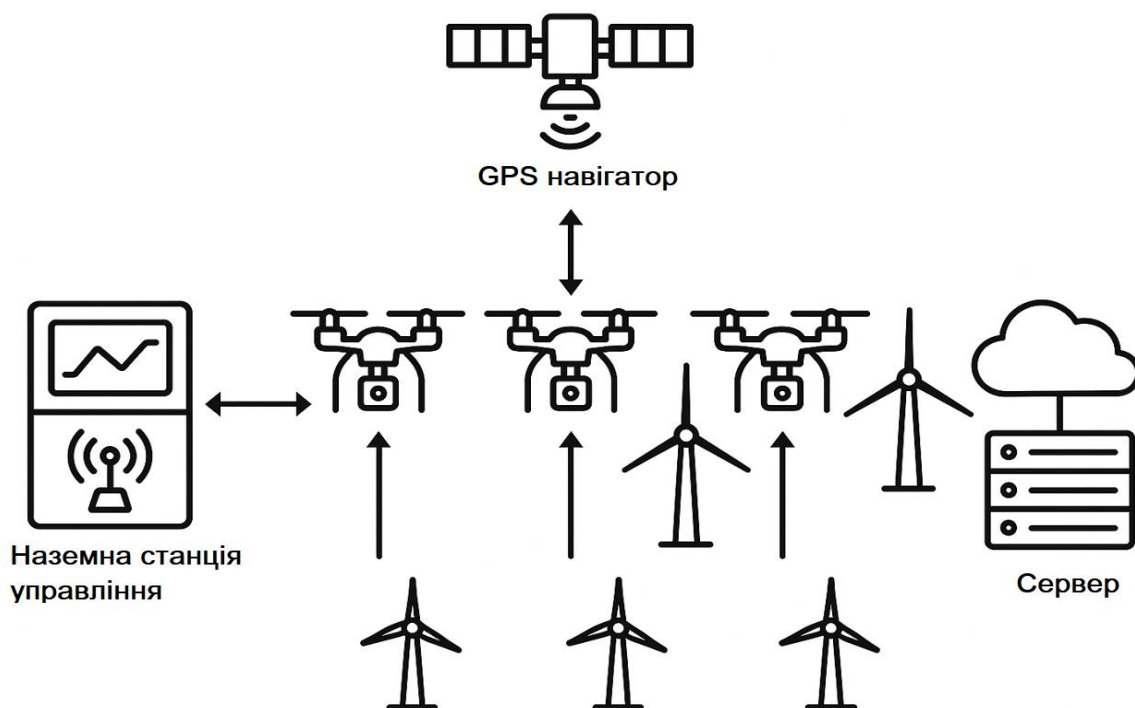


Рисунок 2.1 – Архітектура кіберфізичної системи з декількома БПЛА

Ключовими компонентами такої системи є наступні:

1. Флот БПЛА (дронів), оснащений камерами високої роздільної здатності (візуальні, інфрачервоні), зі встановленими модулями GPS/GLONASS для точної навігації, обладнаний модулями бездротового зв'язку (наприклад, 4G/5G, LoRa або Wi-Fi). А також наявні автономні джерела живлення, заряджання через станції. Можуть працювати автономно або в координації (роєм).

2. Наземна станція управління (система керування місією), яка може бути централізованою або розподіленою, що формує маршрути обльоту, алгоритми обходу перешкод та погодної адаптації, можливість узгодження польотів між кількома дронами (swarm-координація).

3. GPS-навігація та трекінг дає можливість застосування RTK-GPS для сантиметрової точності при обльоті лопатей турбін, реалізацію автономного повернення в точку старту у разі втрати зв'язку, зв'язок між БПЛА та наземною станцією управління.

4. Центр збору та обробки даних здійснює автоматичний прийом фото/відео з дронів, обробку даних для виявлення пошкоджень, зношення, корозії, забруднень, інтеграцію з системами обліку технічного стану вітротурбін.

5. Програмне забезпечення та компоненти штучного інтелекту забезпечують інтерфейс керування польотами з плануванням маршрутів обльоту, використання штучного інтелекту для аналізу стану обладнання.

6. Хмарна/локальна обчислювальна інфраструктура забезпечує зберігання результатів для тривалого моніторингу змін у часі, зберігання даних, обробку зображень та аналітику.

У кіберфізичних системах з декількома безпілотними літальними апаратами, які використовуються для обльоту об'єктів вітрової енергетики, маршрути обльоту можуть формуватися за допомогою централізованого або розподіленого підходу. Обидва підходи мають власні переваги, недоліки та специфіку застосування.

При централізованій системі формування маршрутів усі дані про об'єкти обльоту, поточне положення БПЛА, погодні умови та обмеження місії збираються і обробляються в єдиному центрі керування. Рішення щодо маршрутів приймаються централізовано і передаються кожному дрону індивідуально.

Складовими такої системи є:

- центр обробки даних / сервер управління польотом;
- алгоритми планування маршрутів (напр. алгоритм комівояжера, A*,

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Dijkstra);

- інтерфейс моніторингу місії;
- канали зв'язку з усіма БПЛА.

До переваг можна віднести оптимальне планування, оскільки можливо враховувати глобальні обмеження, щоб мінімізувати час або енерговитрати; просте адміністрування, тому що можливий централізований контроль за усією місією та легка інтеграція з хмарними обчисленнями та IT-інфраструктурою.

Недоліками є вразливість до втрати зв'язку, при втраті зв'язку з сервером БПЛА можуть втратити здатність адаптувати маршрути; більше навантаження на сервер і канали зв'язку та менша гнучкість при непередбачених ситуаціях.

При використанні розподіленої системи формування маршрутів, кожен БПЛА самостійно або в кооперації з іншими БПЛА формує свій маршрут на основі локальної інформації або взаємного обміну даними. Рішення приймаються децентралізовано з використанням вбудованих обчислювальних модулів.

Складовими є:

- бортові обчислювальні модулі на БПЛА;
- алгоритми локального планування (напр. swarm intelligence, RRT, SLAM);
- комунікаційні протоколи для обміну станами між дронами;
- динамічне реагування на зміни (перешкоди, зміна погоди).

В данному випадку перевагами є висока автономність, тобто дрони можуть адаптувати маршрути в режимі реального часу; масштабованість, тому що можна легко додавати нові БПЛА без перенавантаження центральної системи; стійкість, оскільки система продовжує роботу навіть у разі відмови одного елемента.

Краще підходить для розріджених або складних середовищ.

До недоліків можна віднести складність алгоритмів, оскільки є потреба в складному локальному програмному забезпеченні; менше знань про глобальну ситуацію, можливі конфлікти між маршрутами, особливо при високій щільності дронів та вища потреба у високопродуктивному бортовому «залізі».

У централізованому підході планування маршруту здійснюється з єдиного

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

командного центру або обчислювального вузла, де враховуються просторові координати всіх об'єктів, параметри польоту кожного дрона, їхній стан, залишок заряду, погодні умови та конфігурація вітрового парку. Такий підхід дозволяє побудувати глобально оптимізовану стратегію польоту, з урахуванням мінімізації перетину маршрутів, уникнення колізій і синхронізації часу обльоту, але вимагає надійного двостороннього зв'язку між дронами та центром управління.

У розподіленому підході кожен дрон самостійно або у взаємодії з іншими апаратами приймає рішення про свій маршрут, використовуючи дані локальних сенсорів, міждронового зв'язку або алгоритмів колективної поведінки. Такий підхід краще масштабується, знижує навантаження на центральний вузол і підвищує стійкість системи до відмов, однак складніше гарантувати глобальну оптимальність та узгодженість у діях всіх учасників. Обидва підходи можуть бути реалізовані в гібридній формі, де загальна стратегія визначається централізовано, а локальні коригування здійснюються автономно на рівні кожного БПЛА, що особливо актуально в умовах динамічного середовища та змінної вітрової обстановки навколо об'єктів енергетичної інфраструктури.

На практиці часто використовується гібридна архітектура, де центр керування формує базовий план обльоту. БПЛА отримують ці маршрути і в процесі місії можуть їх локально коригувати на основі сенсорних даних або взаємодії з іншими дронами.

Отже, централізовані системи кращі для контрольованих, відкритих територій із стабільним зв'язком.

Розподілені системи підходять для складних середовищ, автономних місій, і роботи без сталого з'єднання.

Гібридна модель є найгнучкішим і практичним варіантом для обльоту вітрових електростанцій, вона поєднує точність і адаптивність.

Безпілотний літальний апарат є складною технічною системою, яка складається з ряду взаємопов'язаних модулів, кожен з яких виконує свою специфічну функцію в межах загального польотного завдання. Основу апарата

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формує конструктивна рама, яка забезпечує механічну стабільність та розміщення інших компонентів. Залежно від типу БПЛА – мультикоптер, фіксованокрилий або гібрид, рама має різну геометрію, проте завжди виконує функції несучої платформи. На ній розташовуються модулі живлення, двигуни, гвинти, плати керування, сенсори, комунікаційні пристрої та навігаційні системи (таблиця 2.4).

Таблиця 2.4 – Опис модулів БПЛА

Модуль	Призначення	Приклад реалізації
GPS	Визначення координат і синхронізація часу	u-blox NEO-M8N
Автопілот	Керування польотом, стабілізація	ArduPilot / PX4
IMU	Орієнтація в просторі	MPU-9250 / ICM-20948
Камера	Захоплення зображень об'єкта	RPi Camera / GoPro / FLIR
Модуль зв'язку	Обмін з GCS або іншими БПЛА	RFD900, WiFi, 4G, LoRa
Енергоживлення	Акумулятор + контролер	LiPo + BMS
Обчислювач	Обробка даних на борту	Raspberry Pi / Jetson Nano

Центральним елементом будь-якого БПЛА є модуль керування польотом, або автопілот. Він відповідає за стабілізацію апарата в повітрі, обробку команд, що надходять від оператора або з наземної станції, та реалізацію автономних режимів польоту. У багатьох системах цей модуль побудований на базі мікроконтролерів, таких як STM32 або ATmega328, які забезпечують обробку сигналів з гіроскопів, акселерометрів, магнітометрів та барометрів. До модуля керування також підключаються GPS-приймачі, які дозволяють реалізовувати геопросторову навігацію, функції повернення додому, трекінг маршруту та стабілізацію позиції.

Модуль навігації включає GPS або GNSS-приймач, часто з підтримкою диференціальних технологій на кшталт RTK або PPK для підвищення точності. Ці компоненти дозволяють визначати координати апарата з точністю до кількох сантиметрів, що критично важливо при обльоті об'єктів інфраструктури, таких як вітрові турбіни. У сучасних БПЛА додатково можуть використовуватися інерційні навігаційні системи (INS), які працюють разом із супутниковими приймачами для стабільного трекінгу в умовах тимчасової втрати сигналу.

Сенсорний модуль охоплює камери (оптичні, інфрачервоні, мультиспектральні), лідари, ультразвукові датчики, а також сенсори для виявлення перешкод. Його роль полягає у зборі візуальної або топографічної інформації з метою аналізу стану об'єктів, створення цифрових моделей місцевості, а також забезпечення безпечної навігації у складних умовах. Отримані дані зберігаються на борту або передаються в реальному часі на наземну станцію.

Модуль живлення складається з акумуляторів (переважно Li-Po або Li-Ion), систем моніторингу заряду, перетворювачів напруги, а також елементів балансування. Живлення подається як на рушійну систему електродвигуни з контролерами швидкості ESC, так і на обчислювальні модулі, сенсори та комунікаційне обладнання. Важливою особливістю цього модуля є його вплив на вагу та час автономної роботи БПЛА.

Комунікаційний модуль забезпечує передачу телеметричних даних, відеосигналу та керуючих команд між БПЛА та оператором. Він може включати радіомодулі на частотах 433 МГц, 868 МГц, 2.4 ГГц або Wi-Fi, а також засоби захищеного з'єднання. У системах реального часу часто застосовуються протоколи MAVLink або аналогічні, що дозволяють інтегрувати БПЛА з наземними станціями керування або інформаційними системами в кіберфізичному середовищі.

Окремо варто згадати про модуль запису даних (логер), який фіксує координати, параметри польоту, навігаційні точки, відео та технічний стан БПЛА. Ці дані використовуються для постмісійного аналізу, корекції моделей польоту та

доказової бази у разі несправностей.

Уся ця система об'єднується в інтегровану платформу, де кожен модуль взаємодіє з іншими за допомогою стандартизованих інтерфейсів, що дозволяє ефективно управляти польотом, збирати високоточні дані та забезпечувати стійкість функціонування навіть у складних умовах польоту поблизу об'єктів вітрової енергетики.

Алгоритм обльоту та навігації безпілотної літального апарата навколо об'єктів вітрової енергетики є ключовим компонентом функціонування кіберфізичної системи, оскільки від нього залежить точність збору даних, безпека виконання місії та ефективність використання ресурсу БПЛА.

Процес починається із попереднього планування місії, що включає завантаження карти місцевості, моделювання положення вітрових турбін, визначення зон обльоту, точок інтересу та висот польоту з урахуванням висоти самих об'єктів. На цьому етапі формується маршрут у вигляді набору GPS-координат, що включає контрольні точки з чітко заданими параметрами: висотою, швидкістю, режимом орієнтації камери, затримкою перед зйомкою тощо.

Після початку польоту дрон орієнтується за даними GPS-модуля, обчислюючи своє положення у просторі та коригуючи траєкторію відповідно до задалегідь заданої місії. Дані з гіроскопа, акселерометра й магнітометра використовуються для внутрішньої стабілізації апарата у тривимірному просторі. Алгоритм виконує постійну перевірку відповідності фактичної траєкторії заданій, і у разі відхилень виконується коригування положення з урахуванням обмежень швидкості, кута нахилу та інерційних характеристик.

У процесі обльоту особливу увагу приділяють маневруванню навколо турбіни, апарат виконує спіральний або сегментований радіальний обліт, підтримуючи постійну відстань від конструкції, що необхідно для отримання якісних зображень поверхонь лопатей і веж. У деяких випадках в алгоритм вбудовується виявлення краю об'єкта за допомогою комп'ютерного зору, що дозволяє адаптивно уточнювати позицію у разі неточностей моделі або змін у

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конфігурації об'єкта.

Коли обліт однієї турбіни завершено, апарат виконує перехід до наступної контрольної точки, враховуючи наявність вітрових потоків, щоб уникнути нестабільності. Алгоритм навігації враховує як глобальні змінні (географічне положення об'єктів), так і локальні (вітрове навантаження, положення сонця, зміни орієнтації апарата в реальному часі). У критичних ситуаціях (втрата сигналу GPS, низький заряд, виявлення перешкоди) активується підпрограма аварійного повернення або безпечного приземлення, в якій координати останньої успішної позиції зіставляються з картою, і на основі цього обирається оптимальна точка для приземлення або повернення.

Після завершення маршруту алгоритм переходить у режим посадки, виконуючи вертикальне зниження з контрольованим зменшенням швидкості. Усі зібрані дані (фотографії, відео, телеметрія, лог-файли) зберігаються на борту або передаються через радіоканал до наземної станції. На всіх етапах навігація супроводжується постійною перевіркою стану систем, що дозволяє адаптувати поведінку дрона до умов польоту, підтримуючи високий рівень автономності й точності в роботі над об'єктами вітрової енергетики.

Протокол взаємодії між безпілотними літальними апаратами у складі кіберфізичної системи, яка здійснює обліт об'єктів вітрової енергетики, визначає, як саме відбувається координація дій між кількома дронами під час місії.

Основні підходи до такої взаємодії поділяються на централізоване керування та децентралізовану роєву логіку.

У випадку централізованого підходу кожен дрон отримує індивідуальні інструкції від центрального обчислювального вузла, що може розташовуватись на наземній станції або на одному з дронів, який виступає у ролі головного вузла. Цей вузол здійснює повне планування маршрутів, призначає ролі, пріоритети та обчислює конфлікти між шляхами, дотримуючись загального розкладу обльоту та стратегічного плану збору даних. Усі дрони в такій системі виконують підлеглу роль, дотримуючись інструкцій, які надходять періодично або у режимі реального

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

часу, через спеціалізований протокол обміну даними, наприклад MAVLink або власний формат на основі TCP/UDP-з'єднання.

У разі втрати зв'язку з центром дрон або призупиняє місію, або перемикається в автономний режим. Така система забезпечує чітку синхронізацію й загальну оптимізацію польоту, однак є вразливою до відмов одного елемента, відсутності каналу зв'язку або перевантаження вузла планування.

Саме тому сучасні дослідження йдуть у напрямі децентралізованих протоколів, що базуються на роевій логіці. У цьому випадку кожен БПЛА виступає як автономний агент, здатний самостійно оцінювати свою позицію, ціль, завдання й приймати рішення на основі локальної інформації та обміну повідомленнями з сусідніми апаратами. Координація в такій системі досягається за допомогою простих правил взаємодії: утримання відстані, узгодження напрямку, уникнення перешкод і кооперація при виконанні спільної задачі.

Такі протоколи часто реалізуються на базі мультиагентних алгоритмів, в яких кожен дрон аналізує стан своїх найближчих сусідів і адаптує свою поведінку, не потребуючи повної картини всього флоту. Це дозволяє досягати високої масштабованості системи, при додаванні нових дронів не потрібна модифікація центрального алгоритму. Крім того, така логіка дозволяє зберігати функціональність при часткових відмовах, поганому зв'язку або втраті окремих учасників. Складність такого підходу полягає у забезпеченні глобальної узгодженості, безпеки взаємного маневрування, узгодженого охоплення об'єктів без пропусків або повторів.

У складних місіях часто застосовуються гібридні протоколи, де базове завдання (наприклад, розподіл зон огляду або черговість турбін) формується централізовано, після чого рій виконує автономне обслуговування своїх сегментів. У такій системі можливе перерозподілення навантаження у разі виявлення несправностей, адаптація до змін навколишнього середовища та зменшення обчислювального навантаження на центральний вузол. Обмін даними в обох підходах реалізується за допомогою бездротових протоколів з низькою

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

затримкою, таких як XBee, Wi-Fi, LoRa або спеціалізовані протоколи сітчастих мереж (mesh), які дозволяють зберігати зв'язок навіть при великій площі покриття або фізичних перешкодах.

Таким чином, протокол взаємодії в системі з кількома БПЛА має ключове значення для стабільної та ефективної роботи при моніторингу вітрових турбін. Вибір між централізованим та роєвим підходом визначається вимогами до точності, надійності, автономності та масштабованості системи.

Отже, перевагами розробки та застосування такої кіберфізичної системи є:

1. Безпечна діагностика без потреби фізичного доступу до турбін.
2. Скорочення часу на обслуговування, особливо у важкодоступних місцях (гірські хребти, морські платформи).

3. Автономність і масштабованість, система може працювати з 1 до 10+ дронів одночасно.

4. Прогнозування зношення обладнання на основі зібраної статистики.

5. Економія ресурсів, зменшення використання підйомної техніки та персоналу.

2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі розглянуто ключові аспекти організації взаємодії між безпілотними літальними апаратами у складі кіберфізичних систем, призначених для обльоту об'єктів вітрової енергетики. Особливу увагу приділено двом принципово різним підходам до управління флотом БПЛА: централізованому керуванню та роєвій (децентралізованій) логіці. Обидва підходи мають власні переваги й обмеження, які суттєво впливають на гнучкість, надійність та ефективність системи в умовах реального середовища.

Централізоване керування забезпечує чіткий контроль, злагоджену координацію дій та можливість глобального оптимального планування польотів. Водночас така система є вразливою до відмов зв'язку чи центрального вузла, що може призвести до повної або часткової втрати функціональності.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Децентралізовані системи, засновані на розв'язній логіці, демонструють високу адаптивність, відмовостійкість та масштабованість, дозволяючи автономним агентам (дронам) самостійно приймати рішення на основі локального аналізу та взаємодії з іншими одиницями. При цьому досягнення узгодженості дій без глобального координатора є складним завданням і вимагає розробки ефективних алгоритмів взаємодії.

У сучасних практичних рішеннях все частіше впроваджуються гібридні моделі, що поєднують сильні сторони обох підходів. Такі системи здатні ефективно розподіляти завдання, адаптуватися до змін навколишнього середовища та забезпечувати стійку й автономну роботу при високій динаміці об'єктів моніторингу.

Таким чином, вибір протоколу взаємодії є критичним етапом проектування кіберфізичної системи з використанням БПЛА. Він має базуватися на особливостях середовища, завдань місії, технічних характеристиках апаратів і вимогах до точності, надійності та масштабованості. Застосування правильного підходу дозволяє реалізувати ефективні автоматизовані рішення для спостереження за інфраструктурою вітрової енергетики.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Опис реалізації модулів апаратного та програмного забезпечення

Апаратно-програмне забезпечення кіберфізичних систем з декількох безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для обльоту об'єктів вітрової енергетики є комплексом взаємопов'язаних компонентів, які забезпечують автоматизоване управління польотами, точне позиціонування, збір і передачу даних, а також їх попередню обробку в режимі реального часу. У таких системах апаратна складова включає самі БПЛА, оснащені польотними контролерами, високоточними GPS/RTK-приймачами, камерами, сенсорами відстані та інерційними модулями (IMU), а також бортовими обчислювальними пристроями, такими як одноплатні комп'ютери або модулі штучного інтелекту. Крім того, до складу апаратного комплексу входять засоби зв'язку для телеметрії та обміну інформацією між апаратами й наземною станцією, а також базова RTK-станція або сервер корекції координат для забезпечення високоточної навігації (рисунок 3.1).

Структурна схема кіберфізичної системи представлена на рисунку 3.1.

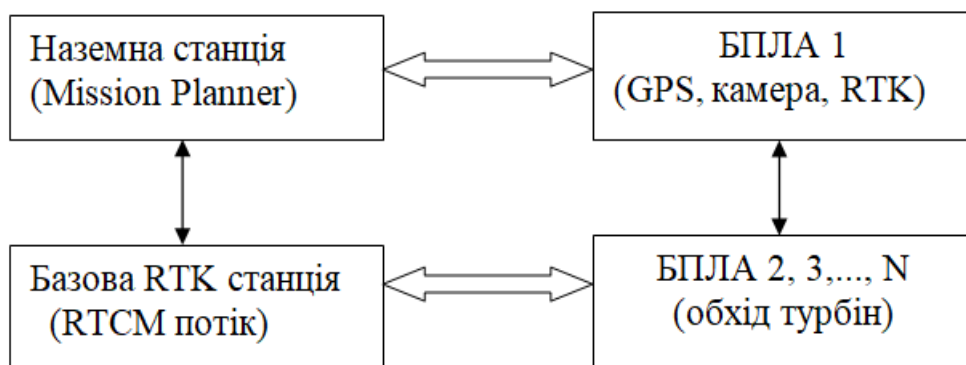


Рисунок 3.1 – Структурна схема кіберфізичної системи

Розглянемо більш детально апаратну реалізацію. Кожен БПЛА виконує автономні або напіваавтономні місії згідно з розподіленим або централізованим

управлінням (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Порівняльна таблиця апаратних платформ для БПЛА в КФС

Компонент	Варіант 1 Базовий	Варіант 2 Просунутий	Варіант 3 Промисловий/RTK
Польотний контролер	Pixhawk 2.4.8	Cube Orange	Cube Blue / CUAUV X7
Платформа ПЗ	ArduPilot	PX4 / ArduPilot	PX4 / ArduPilot
GPS-модуль	u-blox NEO-M8N	u-blox M9N	u-blox ZED-F9P (RTK)
Точність GPS	~2–3 м	~1–2 м	~0.02 м (з RTK)
Бортовий комп'ютер	Raspberry Pi 3B	Raspberry Pi 4B / Jetson Nano	Jetson Xavier NX / TX2
Обчислювальна здатність	Низька	Середня	Висока
Камера / сенсори	Камера 720p	HD/4K, LiDAR Lite	4K, LiDAR, тепловізор
Зв'язок з GCS	SiK Radio (433/915 MHz)	RFD900x / LTE	RFD900x / 5G / NTRIP
Дальність зв'язку	~2 км	~10–40 км	>40 км (LTE/5G)
Живлення	3S–4S Li-Po	4S–6S Li-Po	6S з BMS
Функції безпеки	RTL, GeoFence	Obstacle Avoidance	Автоматична посадка, AI-обробка аварій
Вартість (орієнтовна)	\$300–500	\$700–1500	\$2000+
Сценарій застосування	Навчальні, тестові	Середні обльоти	Високоточне інспектування турбін

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ

Арк.
42

Варіант 1 (базовий) підходить для лабораторних прототипів, хобі-дронів або первинної валідації маршруту без жорстких вимог до точності.

Варіант 2 (просунутий): застосовується у проєктах середньої складності з вимогами до якості відео, стабільності зв'язку та модульності.

Варіант 3 (промисловий/RTK): орієнтований на використання в критичних завданнях, інспекції турбін, мапінгу з RTK-навігацією та машинним баченням.

Основними компонентами є:

- платформа БПЛА (мультикоптер або конверсійний літак);
- польотний контролер, наприклад, PX4, ArduPilot (на базі Pixhawk або Cube);
- модуль GPS (u-blox M8N/M9N або RTK-сумісні модулі);
- бортовий комп'ютер (Raspberry Pi 4, Jetson Nano, або аналогічний для обробки даних);
- модуль радіозв'язку, наприклад, SiK Radio, RFD900, або LTE/5G-модеми;
- сенсори такі як, камери, LiDAR, IMU, альтиметр;
- джерело живлення акумулятор Li-Po з BMS;
- засоби аварійного приземлення (парашут, fail-safe).

Також до апаратної складової входить наземна станція управління (GCS), яка складається з таких компонентів:

- комп'ютер з Mission Planner, QGroundControl або кастомним ПЗ;
- візуалізація даних на мапі (OpenStreetMap, Google Maps API);
- зв'язок із БПЛА через телеметрію (UART, USB, Ethernet, Wi-Fi, 4G/5G);
- обробка телеметрії, моніторинг стану флоту;
- завантаження польотних місій (в форматі *.waypoints або *.plan).

Наземна станція управління (Ground Control Station, GCS) є ключовим елементом кіберфізичної системи з декількох безпілотних літальних апаратів і виконує функції централізованого керування, моніторингу та аналізу інформації, що надходить від БПЛА під час виконання обльоту об'єктів вітрової енергетики.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це спеціалізоване апаратно-програмне середовище, яке забезпечує взаємодію між оператором, польотними модулями дронів і іншими складовими інфраструктури системи, включно з GPS-навігацією, базовою станцією RTK та хмарними сервісами обробки даних.

На апаратному рівні наземна станція зазвичай являє собою комп'ютер або вбудовану систему (ноутбук, панельний ПК, планшет із Windows або Linux), обладнану засобами комунікації – телеметричними радіомодулями (наприклад, RFD900, SiK), Wi-Fi адаптерами, LTE/5G-модемами або спеціалізованими приймачами NTRIP-корекції. Через ці канали дані з БПЛА надходять у реальному часі, що дозволяє не лише бачити поточне місцезнаходження кожного дрона, а й відстежувати параметри його польоту, такі як висота, швидкість, рівень заряду батареї, температура, навантаження двигунів тощо. У разі втрати сигналу або виникнення аварійної ситуації саме GCS приймає рішення про зміну маршруту, повернення додому (RTL) або аварійну посадку.

Базова RTK-станція (Real-Time Kinematic base station) є невід'ємною частиною систем високоточної супутникової навігації, яка забезпечує корекцію GPS/GLONASS/Galileo-позиціонування в реальному часі. Вона є ключовим елементом у кіберфізичних системах, що використовують БПЛА для інспекції вітрових електростанцій, оскільки дозволяє досягати сантиметрової точності координат, необхідної для прольотів уздовж лопатей турбін, фіксованих точок огляду, 3D-картографування та фотограмметричних задач.

У класичній конфігурації RTK-система складається з двох компонентів: базової станції, що фіксована на відомій координаті, та рухомого приймача (rover), встановленого на БПЛА.

Базова станція приймає сигнали GNSS (глобальних навігаційних супутникових систем) від супутників, розраховує власне положення та визначає похибки у вимірах. Потім вона передає ці диференціальні корекції на дрон або безпосередньо через радіомодем (наприклад, по протоколу RTCM), або через мережу NTRIP (інтернет-трансляція корекцій).

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основними компоненти базової RTK-станції є наступні:

- GNSS-приймач із підтримкою RTK, найчастіше використовується модуль u-blox ZED-F9P, який підтримує багаточастотну роботу з GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou і забезпечує точність на рівні 1–2 см при правильному налаштуванні;
- GNSS-антена (наприклад, Tallysman TW3882 або аналогічна) забезпечує стабільний прийом супутникового сигналу з мінімальними фазовими помилками. Монтується на відкритій місцевості або штативі, бажано на відомій геодезичній точці;
- контролер або мікрокомп'ютер, може бути ноутбук, Raspberry Pi, або спеціалізований RTK-контролер, який виконує обробку даних і керує передачею корекцій. Застосовуються програми типу u-center, RTKLib, SNIP, Mission Planner RTK injection;
- модуль зв'язку;
- радіомодем (напр., RFD900, SiK 433/915 МГц) для прямої передачі корекцій на дрон на відстань до 10–40 км у режимі прямої видимості;
- інтернет-з'єднання для передавання RTCM через NTRIP-сервер (особливо актуально для роботи на великих відстанях або в розосереджених системах);
- джерело живлення, наприклад, акумулятор, PowerBank або стабілізоване живлення від наземної інфраструктури. RTK-станція повинна працювати стабільно упродовж усієї місії.

Розглянемо принципи дії базової RTK-станції, вони наведені нижче:

1. Фіксація координат, базова станція встановлюється на відомій точці або протягом певного часу визначає її середнє положення з високою точністю.
2. Отримання супутникових даних, приймач базової станції фіксує сигнали з GPS/GNSS-супутників.
3. Генерація корекцій, алгоритм обчислює різницю між теоретичними й фактичними координатами та формує RTCM-повідомлення.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Передача корекцій, дані в режимі реального часу передаються до рухомого приймача на дроні.

5. Підвищення точності, Rover (на дроні) поєднує власні GPS-дані з корекціями та отримує точне положення з похибкою до 1–2 см у горизонтальній площині.

Розглянемо більш детально приклад комплекту базової RTK-станції (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Приклад комплекту базової RTK-станції

Компонент	Приклад	Орієнтовна ціна
GNSS модуль	u-blox ZED-F9P (ArduSimple)	\$200–250
Антенa GNSS	Tallysman TW3882	\$100–150
Радіомодем	RFD900x (2 шт.)	\$200
Контролер	Raspberry Pi 4 / ноутбук	\$50–500
Живлення	PowerBank 20000 mAh	\$30
ПЗ	RTKLib / SNIP / Mission Planner	Безкоштовно

Перевагами використання базової RTK-станції є сантиметрова точність позиціонування навіть у складному рельєфі чи поблизу об'єктів; стабільність та відтворюваність маршруту, що дозволяє повторно облітати одну й ту саму лопать турбіни з мінімальним відхиленням; інтеграція з фотограмметрією, тобто точне геоприв'язування кожного кадру та зменшення впливу атмосферних та супутникових похибок.

Програмне забезпечення наземної станції виконує функції керування польотами, побудови маршрутів, візуалізації даних, збереження логів і діагностики роботи системи. Найпоширенішими рішеннями є відкриті платформи Mission Planner (для ArduPilot) та QGroundControl (для PX4), які підтримують створення польотних місій у графічному інтерфейсі, редагування маршрутів, встановлення контрольних точок, обмежень польоту (GeoFence), зон безпеки та

параметрів автопілоту. Через GCS користувач може завантажити в дрон файли місій у форматі .waypoints або .plan, відслідковувати виконання завдання в реальному часі на карті (Google Maps, OpenStreetMap), а також керувати кількома БПЛА одночасно, якщо реалізована мультидронна архітектура.

Крім основної польотної функціональності, GCS може бути інтегрована з модулями обробки даних, наприклад, для отримання фотограмметричної інформації, виявлення дефектів на лопатях вітротурбін за допомогою штучного інтелекту або передавання зображень на хмарні сервіси для створення 3D-моделей місцевості. Наземна станція також приймає потік RTCM-корекцій від базової RTK-станції або NTRIP-сервера та передає його до БПЛА для забезпечення високоточних навігаційних розрахунків. Завдяки цьому досягається сантиметрова точність позиціонування, що особливо важливо під час інспекції вітроколон або виконання польотів на фіксованій висоті вздовж лопатей.

У більш просунутих реалізаціях GCS взаємодіє з іншими модулями кіберфізичної системи, наприклад з диспетчерським центром або SCADA-системами вітропарку, що дозволяє інтегрувати дані про технічний стан турбін безпосередньо в інфраструктуру експлуатаційного моніторингу. Наземна станція може також містити механізми збереження логів польотів, телеметрії, зображень та відео, з подальшим експортом у формати .tlog, .bin, .csv або геоприв'язані архіви з фотоданими.

Отже, GCS є інтелектуальним та комунікаційним центром, який забезпечує не тільки запуск і контроль дронів, а й повноцінну аналітичну підтримку інспекційних місій, сприяє автоматизації процесів управління, підвищенню безпеки польотів і адаптивності всієї системи до складних умов роботи на вітроелектростанціях.

Програмна частина системи охоплює як вбудоване програмне забезпечення на рівні мікропрограм (прошивок) для польотних контролерів, так і високорівневі програмні модулі, які керують плануванням місій, координацією між БПЛА та обробкою даних. Польотні контролери зазвичай працюють під керуванням

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відкритих платформ типу ArduPilot або PX4, що підтримують MAVLink-протокол обміну. Для реалізації навігаційних функцій і стабілізації польоту використовується комбінація GPS-даних, показів IMU та алгоритмів фільтрації (наприклад, розширеного фільтру Калмана). Бортові комп'ютери на кожному дроні виконують задачі локальної обробки зображень, виявлення дефектів, побудови 3D-моделей та збереження результатів в стандартизованих форматах (GeoTIFF, JPEG, JSON тощо).

На рівні наземної інфраструктури використовується програмне забезпечення для моніторингу та керування місіями, зокрема такі платформи, як Mission Planner або QGroundControl, які забезпечують візуалізацію маршрутів польоту, контроль телеметрії, діагностику систем та передавання команд у реальному часі. Програмна логіка дозволяє автоматизовано створювати місії на основі координат об'єктів вітроустановок, генерувати оптимальні траєкторії обльоту, враховуючи особливості рельєфу, погодні умови та конфігурацію вітротурбін. Завдяки використанню алгоритмів маршрутизації, таких як задача комівояжера або евристичні методи, забезпечується ефективне розподілення завдань між декількома дронами.

Система також включає механізми комунікації між БПЛА для координації дій у груповому польоті. Ці функції можуть реалізовуватися через Wi-Fi або радіоканали з підтримкою мережевих протоколів, включаючи mesh-архітектуру. У більш просунутих конфігураціях можливе використання ROS (Robot Operating System) для організації взаємодії модулів, включаючи розподілену обробку даних і міжапаратне сповіщення. Усе це перетворює систему на повноцінну кіберфізичну платформу, здатну адаптивно реагувати на зміни у середовищі, виконувати інтелектуальну обробку інформації та забезпечувати гнучке управління технічним станом об'єктів вітрової енергетики.

Автономне планування маршруту включає в себе інтерфейс для створення місій, алгоритми обходу об'єктів, обмін даними між БПЛА та обробку отриманих даних. Розглянемо ці складові більш детально.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтерфейс для створення місій потрібен для керування місіями. Для керування місіями використовується спеціальний програмний модуль з графічним або API-інтерфейсом, який дозволяє оператору задавати координати вітрових турбін, параметри огляду, шаблон обльоту та обмеження (наприклад, висоту, швидкість, зони заборони). Такий інтерфейс може бути реалізований у вигляді десктопного додатку (напр., плагін до Mission Planner або QGroundControl), вебінтерфейсу (на Node.js або Flask), або ROS-пакета з інтеграцією в Rviz.

Алгоритми обходу об'єктів включає в себе обліт турбін за шаблоном, механізм уникнення зіткнень та механізм оптимізації маршрутів.

Для кожної турбіни генерується маршрут на основі заданого шаблону. Найчастіше це спіраль (гелікальна траєкторія) або кільця на фіксованих рівнях висоти. Траєкторія визначається у полярній системі координат навколо центру турбіни.

Уникнення зіткнень реалізується через динамічні карти оточення, які будуються на основі даних з сенсорів (Lidar, ToF, стереокамери). Алгоритми типу ORCA (Optimal Reciprocal Collision Avoidance), RRT* (Rapidly-exploring Random Tree) та DWA (Dynamic Window Approach) дозволяють дронам змінювати траєкторію в реальному часі, зберігаючи безпечну відстань до об'єктів.

Оптимізація маршруту необхідна для обльоту великої кількості турбін найбільш ефективним шляхом. Для обльоту великої кількості турбін використовується розв'язання задачі комівояжера (TSP), а також більш складні евристики, як генетичні алгоритми (GA), алгоритм мурашиних колоній (ACO) або Particle Swarm Optimization. Метою є мінімізація загального часу польоту або споживання енергії всіма дронами.

GPS-навігація та контроль забезпечується RTK-приймачами (наприклад, ZED-F9P) забезпечують високу точність (до 2 см), необхідну для стабільного позиціонування дрона поруч із лопатями турбіни. Всі корекції надходять у реальному часі з базової станції через RTCM потік.

Фільтрація даних необхідна, щоб фільтрувати дані для обробки, оскільки

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

GPS-дані містять шум і можуть бути неповними. Для згладжування використовується фільтр Калмана або Extended Kalman Filter (ЕКФ), який поєднує дані з GPS і IMU, формуючи згладжену та передбачувану траєкторію. У платформах PX4 і ArduPilot ЕКФ є частиною стандартної навігаційної підсистеми. Інтеграція GPS з IMU дозволяє стабілізувати політ у зонах зі слабким GPS (наприклад, біля вежі турбіни) шляхом переходу на INS-режим (Inertial Navigation System). Дані акселерометра, гіроскопа та GPS зливаються в єдину систему координат у реальному часі.

Обмін даними між БПЛА містить протоколи MAVLink та ROS, Mesh-мережу та переадресацію даних.

Обмін телеметрією, командами, координатами та статусом відбувається через протокол MAVLink, що підтримується автопілотами ArduPilot, PX4, а також GCS. В екосистемі ROS (Robot Operating System) реалізуються окремі вузли для керування польотом, комунікації, обміну планами місій та аварійної взаємодії між дронами.

Для взаємодії між БПЛА, особливо за відсутності прямого зв'язку з GCS, використовується mesh-мережа, збудована на технологіях:

- ESP-NOW (ESP32, короткі повідомлення, надзвичайно енергоефективно);
- Wi-Fi Mesh (802.11s) для високошвидкісного обміну даними (фото/відео);
- Zigbee / XBee Mesh для низькошвидкісного, але надійного зв'язку.

Переадресація даних відбувається при втраті прямого зв'язку з GCS або базовою станцією, дрони можуть передавати повідомлення один через одного. Реалізація алгоритмів типу multi-hop routing (OLSR, AODV), дозволяє зберігати канал телеметрії до останнього активного вузла.

Обробка отриманих даних полягає в зборі фото або відео з камер БПЛА, побудові 3D-моделей турбін та виявленні дефектів (AI/ML).

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

БПЛА оснащуються RGB або мультиспектральними камерами. Зображення фіксуються в ключових точках маршруту (Waypoint → TakePhoto). Запис синхронізується з GPS-мітками для подальшого геопозиціонування.

Після польоту здійснюється обробка знімків за допомогою:

- SfM (Structure from Motion) програми типу Agisoft Metashape, OpenMVG/OpenMVS, COLMAP;

- LiDAR SLAM, якщо на борту використовується лідар, для побудови карти точок у режимі реального часу (наприклад, Cartographer SLAM або LOAM).

Для виявлення дефектів (AI/ML) фото обробляються моделями глибокого навчання, такими як:

- CNN (Convolutional Neural Networks) для класифікації та виявлення тріщин, ерозії, забруднень;

- YOLO / Detectron2 / EfficientDet для виявлення дефектів у реальному часі;

- сегментаційні моделі (U-Net) для точного виділення пошкоджених ділянок.

Результати аналізу (теплові карти, звіти) інтегруються у GCS або передаються до SCADA-систем для подальшого прийняття рішень.

3.2 Алгоритм планування маршруту для кіберфізичної системи з декількох БПЛА

Алгоритм планування маршруту для кіберфізичної системи з декількох БПЛА, що облітають об'єкти вітрової енергетики з GPS-навігацією, має критичне значення для ефективності, безпеки та точності виконання інспекційних завдань. Його реалізація поєднує аналіз геопросторових даних, врахування динаміки БПЛА, параметрів вітрових турбін і вимог до фотограмметрії.

Нижче наведено детальний опис типового алгоритму планування маршруту з урахуванням особливостей обльоту вітроустановок:

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Вхідні дані для планування – географічні координати турбін (GPS / WGS84 або локальна система координат).
2. Розміри об'єкта, тобто діаметр ротора, висота щогли, довжина лопатей.
3. Модель рельєфу місцевості (DEM), якщо турбіни встановлені на горбистій місцевості
4. Зони обмеження польоту (No-Fly Zones), такі як дороги, ЛЕП, приватні ділянки, зони обмежень BVLOS.
5. Режим огляду, тобто радіальний (навколо турбіни), вздовж лопаті, спіральний тощо.
6. Технічні характеристики БПЛА такі, як швидкість, час польоту, кут огляду камери, радіус безпечного обльоту.
7. Тип місії, наприклад моніторинг, інспекція пошкоджень, фотограмметрія, 3D-реконструкція

Вхідні дані для планування місії обльоту вітрових турбін за допомогою багатьох БПЛА є ключовими для забезпечення ефективного, безпечного та якісного виконання завдань інспекції. Вони визначають не лише геометрію майбутніх маршрутів, але й технічні обмеження, адаптацію до місцевості, вибір режиму огляду та алгоритми оптимізації. Нижче подано детальний опис основних вхідних параметрів, які враховуються при формуванні автономних польотних місій.

Основою маршруту є точне просторове положення кожної вітрової турбіни, яке задається у вигляді координат:

GPS (WGS84) – стандартна система глобального позиціонування, найчастіше використовується в комерційних і дослідницьких проектах. Координати подаються у форматі широта/довгота/висота (Latitude, Longitude, Altitude).

Локальні системи координат (UTM, місцеві прив'язки) – використовуються у випадках, коли зручніше оперувати метричними величинами (наприклад,

відстані між турбінами на площині), або коли потребується інтеграція з GIS/кадастровими системами.

Ці координати стають центральними точками, навколо яких буде побудований обліт.

Фізичні параметри турбіни необхідні для генерації безпечних і коректних траєкторій.

Діаметр ротора впливає на радіус безпечного обльоту. Наприклад, при діаметрі 100 м та дистанції безпеки 10 м, дрон має облітати на відстані не менше 60 м від осі.

Висота щогли (hub height) визначає вертикальні ділянки маршруту та зони підйому/спуску.

Довжина лопатей особливо важлива, якщо здійснюється огляд лопаті по всій довжині. Планування враховує можливість зіткнення при повороті лопатей.

Ці параметри допомагають автоматизовано сформувати «оболонку обльоту», тобто 3D-контур, у межах якого дрон повинен виконати інспекцію.

У гірських або горбистих регіонах висота над рівнем моря може сильно варіюватися навіть у межах одного парку турбін. Для врахування цього використовується:

– DEM (Digital Elevation Model) – цифрова модель рельєфу, яка дозволяє коригувати абсолютну висоту польоту для підтримання постійної висоти над землею (AGL).

– DSM (Digital Surface Model) модель, що враховує також будівлі, дерева тощо, використовується для уникнення перешкод.

Із DEM можна врахувати оптимальні траєкторії набору висоти, зменшити витрати енергії та уникнути «мертвих зон» зв'язку.

Планування місії враховує обмеження, пов'язані з безпекою, законодавством і логістикою.

Інфраструктура – лінії електропередач, автомагістралі, аеродроми, приватна власність.

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Правові зони – зони заборони польотів (наприклад, обмеження BVLOS Beyond Visual Line of Sight).

Безпечна зона для аварійного приземлення – буферні зони на випадок втрати управління або батареї.

Усі ці області позначаються як полігони на мапі, в які маршрут не має права заходити. Підсистема планування використовує алгоритми обхідних траєкторій або змінює точку старту/фінішу.

Тип обльоту залежить від цілі місії та типу дефектів, які потрібно виявити.

Радіальний обліт коли дрон рухається по колу навколо щогли турбіни, з фіксованим радіусом і кутом нахилу камери. Підходить для загального огляду.

Обліт вздовж лопаті здійснюється по траєкторії, паралельній лопаті. Може бути необхідним точне позиціонування та орієнтація камери.

При спіральному обльоті дрон підіймається по гвинтовій траєкторії навколо щогли, фіксуючи поверхню під різними кутами. Підходить для 3D-реконструкції. Усі режими можуть комбінуватися або автоматично змінюватися залежно від виявлених об'єктів чи зовнішніх умов.

Для реального планування необхідно враховувати фізичні обмеження дрона.

Максимальна швидкість польоту впливає на час обльоту, особливо в умовах вітру

Час автономної роботи (Flight Time), це критичний для розрахунку кількості точок огляду, запасу батареї на повернення.

Кут огляду камери (Field of View) визначає кількість проходів, необхідних для покриття площі турбіни.

Радіус безпечного обльоту – це мінімальна допустима дистанція до об'єкта, щоб уникнути зіткнення.

Програмне забезпечення повинно адаптувати маршрут під параметри конкретного дрона в реальному часі.

Тип завдання безпосередньо впливає на тактику польоту.

Моніторинг – це швидке охоплення багатьох турбін з меншою роздільною

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здатністю.

Інспекція пошкоджень – це обліт з високою точністю та близькою дистанцією, можливо з повторним оглядом під іншим кутом.

Фотограмметрія – це велика кількість фотографій з перекриттям 80–90%, що потребує стабільної висоти та рівного освітлення.

3D-реконструкція – складна траєкторія з різних кутів, поєднання даних з RGB-камери, IMU та, можливо, LiDAR.

Розглянемо приклад функціонування такої кіберфізичної системи.

Змоделюємо дані для проведення експерименту.

Спочатку нам необхідно сформувати вхідні дані до інспекції. Етап збору вхідних даних є критично важливим для якісного планування, проведення та аналізу інспекції. Саме на цьому етапі формуються технічні, логістичні та аналітичні основи всієї операції. Метою цього етапу є забезпечення максимальної точності результатів та ефективність польотів дронів. Ось основні причини, чому цей етап необхідний:

1. Вхідні дані дозволяють правильно задати маршрути польоту дронів, визначити висоту, зони обльоту, точки зльоту/посадки, а також уникнути небезпечних ділянок або перешкод.

2. Залежно від типу турбіни, її розміру, місцевості та поставлених завдань підбирається відповідне обладнання: дрон, камера, сенсори, GPS-навігація. Це впливає на якість і точність даних.

3. Погодні параметри, зібрані перед інспекцією, впливають на безпеку польотів і стабільність зображень. Дані про вітер, температуру, освітлення дозволяють вибрати оптимальний час для проведення зйомки.

4. Вхідні координати місцевості, RTK-дані та система навігації забезпечують прив'язку кожного кадру до конкретного місця в просторі, що критично для подальшого аналізу та 3D-моделювання.

5. Завдяки точним вхідним даним можна мінімізувати кількість польотів, заощадити час і ресурси, уникаючи повторних вильотів через неповні або неякісні

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дані.

6. Дотримання норм авіаційної безпеки, зони обмеження польотів, дозвільних вимог також залежить від коректно зібраної попередньої інформації.

Тобто, в результаті виконання цього етапу ми отримали такі дані:

1. Загальні відомості, до яких відносяться:

- об'єкт інспекції – вітрова турбіна Vestas V112-3.0MW;
- розташування – вітропарк в Одеській обл., Україна;
- дата інспекції 5 травня 2025 року;
- тип інспекції візуальна + 3D-моделювання + термографія;
- тривалість польоту 2 години 18 хвилин;
- кількість дронів 2 одиниці (DJI Matrice 300 RTK, DJI Phantom 4 RTK).

2. Технічні параметри зйомки:

- роздільна здатність фото 48 МП;
- кількість знімків 3 204 кадри;
- висота польоту від 10 до 50 м;
- GPS-прив'язка RTK-корекція з точністю до 2 см;
- температурний діапазон під час зйомки: +23...+26 °С.

Візуалізація результатів інспекції є ключовим етапом, що перетворює «сирі» дані на зрозумілу, інтерпретовану інформацію. Вона дозволяє швидко виявити пошкодження, оцінити їхнє розташування, розміри та критичність без потреби в складному аналізі таблиць чи чисел. Завдяки 3D-моделі, теплокартам, ортофотопланам та графікам висоти фахівці можуть бачити об'єкт у динаміці, що особливо важливо для складних конструкцій. Це спрощує прийняття рішень щодо ремонту, обслуговування або повторної інспекції. Візуалізація також є ефективним інструментом комунікації, як для внутрішніх технічних команд, так і для зовнішніх партнерів чи страхових компаній. Крім того, вона формує доказову базу, яка може бути використана в судових, аудиторських або гарантійних процесах.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У результаті інспекції турбіни було сформовано повний набір візуальних матеріалів, які дають можливість всебічно проаналізувати стан об'єкта.

Першим елементом є ортофотоплан – це зшите панорамне зображення турбіни в надвисокій роздільній здатності, геоприв'язане до координат місцевості. Воно створено у масштабі 1:100 із роздільною здатністю 0.5 см/піксель та доступне у форматах GeoTIFF і PDF. Такий формат дозволяє точно локалізувати дефекти та інтегрувати зображення у ГІС-системи.

Далі була побудована 3D-модель турбіни, створена методом Structure from Motion (SfM). Модель експортується у формати .OBJ, .STL та PDF (інтерактивна версія) і має точність реконструкції до 1 см. Вона застосовується для об'ємних вимірювань, аналізу деформацій і моделювання техобслуговування.

Також підготовлена карта дефектів, на якій візуалізовано 28 точок пошкоджень різного рівня критичності (рисунок 3.1). Зокрема, виявлено 15 зелених (некритичних), 9 жовтих (середнього рівня) та 4 червоних (критичних) дефекти. До них належать тріщини на лопатях, відшарування покриття та ознаки корозії кріплень. Карта представлена у вигляді інтерактивного SVG-файлу та доповнена таблицею координат.

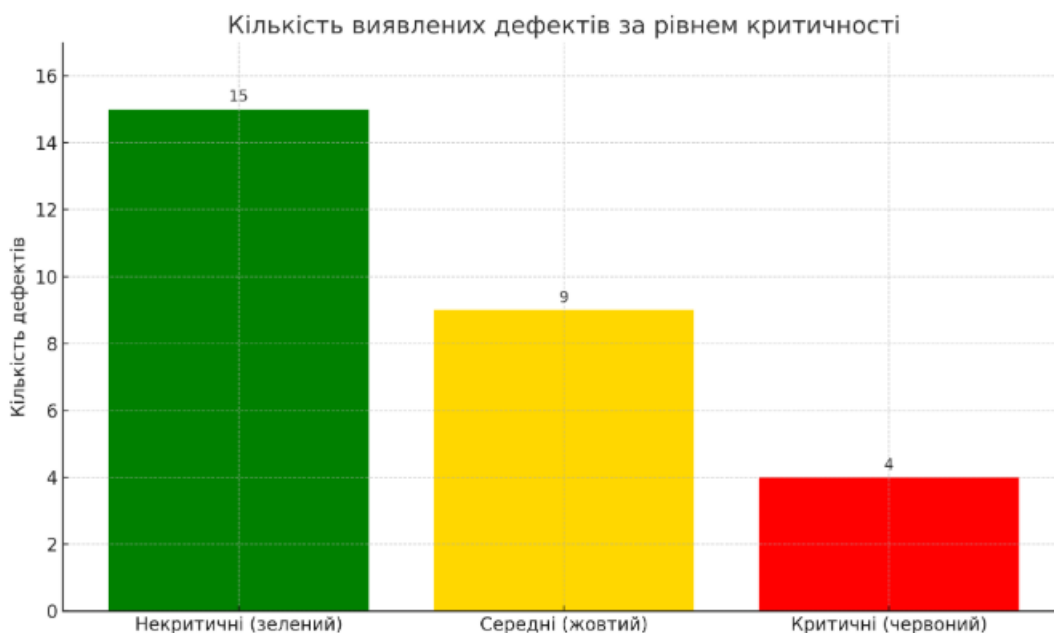


Рисунок 3.1 – Карта дефектів

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Четвертий елемент – це графік висоти польоту, який показує зміну висоти дрона протягом місії (рисунок 3.2). У ньому враховано особливості рельєфу, а зони ризику для точності даних позначені червоним. Цей графік надається у форматах PNG, PDF і CSV.



Рисунок 3.2 – Графік висоти польоту дрона

Завершує візуалізацію теплокарта покриття огляду, яка демонструє зони, охоплені камерами дронів. Згідно з аналізом, було охоплено 94% поверхні турбіни, а решта 6% потрапили в "мертві зони", переважно у важкодоступних ділянках. Ця інформація представлена у вигляді PNG-зображення та інтерактивної HTML-карти.

Ці візуальні дані створюють цілісну картину технічного стану об'єкта й значно полегшують прийняття рішень щодо ремонту або обслуговування.

AI-аналітика у сфері технічного контролю дозволяє автоматизовано виявляти пошкодження на об'єктах, таких як щогли чи лопаті вітрових турбін. Основні компоненти звітності включають такі візуалізації та метрики, як гістограми кількості тріщин за зонами, результати класифікації за типом пошкодження та ймовірність правильного розпізнавання.

Гістограми кількості тріщин за зонами демонструють розподіл дефектів по різних частинах конструкції (рисунок 3.3). Зокрема, виділяють основні зони:

- щогла – вертикальна опора, де можуть виникати тріщини через вібрації чи навантаження;
- лопаті – рухомі частини, де дефекти часто з'являються внаслідок механічного зносу, ударів або атмосферних впливів.

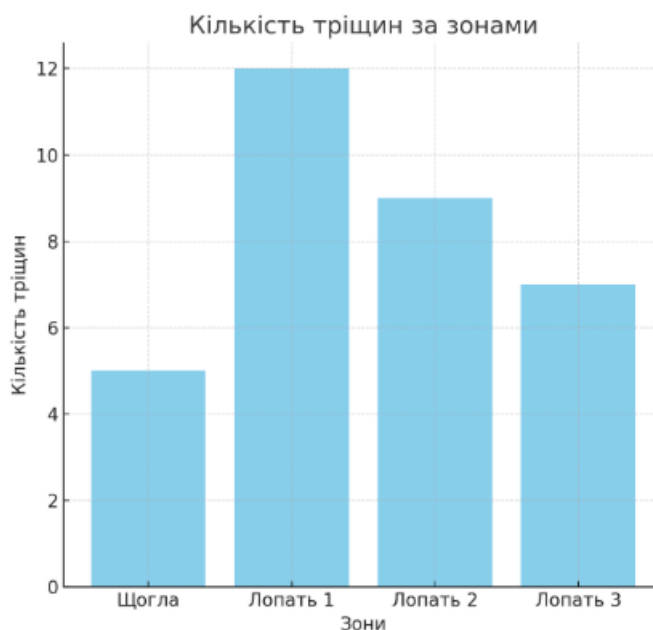


Рисунок 3.3 – Кількість тріщин за зонами

Кожна зона представлена окремою категорією на гістограмі, а кількість виявлених тріщин, як значення по осі Y. Це дозволяє швидко оцінити, в якій зоні зосереджено найбільше проблем.

AI-система не лише виявляє дефекти, але й класифікує їх за типами. Основними категоріями є такі, як поверхнева тріщина, глибока тріщина, відшарування матеріалу, корозія та механічні пошкодження (удари, вм'ятини). Ці результати представлені у вигляді кругової діаграми або таблиці, що відображає відсотковий розподіл кожного типу пошкодження (рисунок 3.4).

Для кожного виявленого дефекту система надає так званий confidence score, тобто показник впевненості моделі у своїй класифікації. Це значення варіюється від 0 до 1 (або 0–100%) і показує, наскільки система впевнена у своєму рішенні.

Наприклад, тріщина на лопаті, її тип – глибока тріщина, ймовірність = 0.94, пляма на щоглі, її тип – це корозія, з ймовірністю 0.77.

Ця метрика допомагає операторам приймати рішення: високий score свідчить про надійне виявлення, а низький може потребувати додаткової перевірки або повторного аналізу.



Рисунок 3.4 – Класифікація типів пошкоджень об'єктів вітрової енергетики

У ході тепловізійного обстеження за допомогою штучного інтелекту було виявлено температурну аномалію у верхній частині щогли, в зоні з'єднання з лопаттю (рисунок 3.5).

Максимальна зафіксована температура становила 85°C, що суттєво перевищує фонові значення в межах 45–50°C. Температурна різниця у понад 35°C свідчить про наявність локального перегріву, що може бути спричинено внутрішнім тертям, пошкодженням теплоізоляції або потенційним коротким замиканням у вузлі. Площа перегрітої ділянки орієнтовно становить 0.12 квадратного метра. Система класифікувала аномалію з ймовірністю правильного розпізнавання 92%, що дозволяє з високою впевненістю стверджувати про достовірність виявлення.

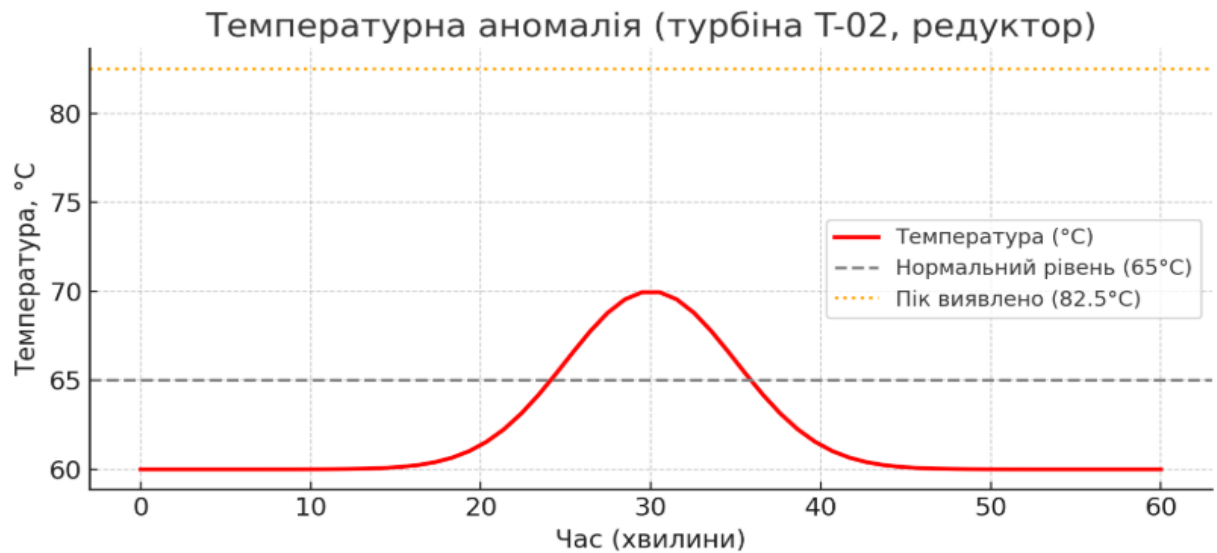


Рисунок 3.5 – Температурна аномалія

Враховуючи характер та розмір аномалії, доцільно провести додаткову технічну діагностику та оцінити доцільність тимчасового відключення вузла з подальшим обстеженням. Також можна отримувати результуючі показники (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Результуюча діаграма виявлених дефектів

Отже, інформація, зібрана під час місій, аналізується автоматизованими засобами. Є можливість отримати 3D-моделі об'єктів, фотограмметричні карти та на основі цього було змодельовано виявлення низки пошкоджень конструкцій (наприклад, тріщини лопатей, термічні аномалії). Алгоритми на базі штучного інтелекту здатні успішно ідентифікувати типи дефектів та оцінити їх критичність, що дозволяє використовувати цю систему для попереджувального технічного обслуговування.

3.3 Висновки до третього розділу

У ході проєктування кіберфізичної системи, що включає автономні БПЛА, GPS-навігацію з RTK-корекцією, засоби передачі даних і аналітичні алгоритми, було підтверджено її здатність забезпечувати високоточний обліт і ефективну інспекцію об'єктів вітроенергетичної інфраструктури.

Система здатна успішно реалізувати автономне планування маршрутів обльоту турбін з урахуванням геометрії об'єктів, зони обмеження польоту, рельєфу місцевості та технічних обмежень БПЛА. Планувальник місій, побудований на основі просторових координат та оптимізований відповідними алгоритмами (TSP, спіральний або радіальний обліт), забезпечив повне охоплення об'єктів без перетинів і зайвих повторів.

Використання RTK-модуля дозволило досягти сантиметрової точності позиціонування, а інтеграція даних з IMU забезпечила стабільність польоту навіть за наявності зовнішніх збурень. Обробка сенсорних даних здійснювалась із застосуванням фільтра Калмана, що зменшило вплив шуму в координатах та орієнтації.

Передача даних між БПЛА та наземною станцією відбувається стабільно завдяки застосуванню протоколу MAVLink у поєднанні з бездротовою mesh-мережею. Це дозволяє в режимі реального часу передавати зображення, телеметрію та повідомлення про стан польотного завдання.

Інформація, зібрана під час місій, аналізується автоматизованими засобами.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані 3D-моделі об'єктів, фотограмметричні карти та на основі цього змодельовано виявлення низки пошкоджень конструкцій (наприклад, тріщини лопатей, термічні аномалії). Алгоритми на базі штучного інтелекту здатні успішно ідентифікувати типи дефектів та оцінити їх критичність, що дозволяє використовувати цю систему для попереджувального технічного обслуговування.

Загалом, проведені дослідження свідчать про перспективність запропонованої системи, як для регулярного моніторингу, так і для швидкого виявлення несправностей на об'єктах альтернативної енергетики. Надалі можлива інтеграція з цифровими платформами обліку та прогнозування стану обладнання для побудови повноцінної інтелектуальної інспекційної інфраструктури.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було розроблено кіберфізичну систему з декількох БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією.

У межах розділу 1 було визначено основні поняття кіберфізичних систем, проведено огляд класифікації та характеристик безпілотних літальних апаратів, що дало змогу зрозуміти їх функціональні можливості, а також дізнатись про роль БПЛА як ключових компонентів сучасних кіберфізичних систем. Основна увага була зосереджена на тому, як параметри БПЛА впливають на архітектуру, логіку дій та ефективність у конкретних застосуваннях, зокрема в контексті автоматизованих, геопросторово-орієнтованих задач.

Розглянута класифікація продемонструвала, що кожен тип БПЛА відіграє свою роль у побудові кіберфізичних систем. Також було розглянуто навігаційні можливості БПЛА, зокрема використання GPS та GNSS у поєднанні з INS для формування точного, стабільного позиціонування, що є критично важливим для кіберфізичних систем. За результатами дослідження встановлено, що застосування високоточних протоколів, таких як RTK та PPK, дозволяє не лише точно слідувати маршрутам, а й інтегрувати отримані координати в обчислювальні ядра систем управління, з можливістю зворотного аналізу та адаптації.

У другому розділі розглянуто ключові аспекти організації взаємодії між безпілотними літальними апаратами у складі кіберфізичних систем, призначених для обльоту об'єктів вітрової енергетики.

У сучасних практичних рішеннях все частіше впроваджуються гібридні моделі, що поєднують сильні сторони обох підходів. Такі системи здатні ефективно розподіляти завдання, адаптуватися до змін навколишнього середовища та забезпечувати стійку й автономну роботу при високій динаміці об'єктів моніторингу.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, вибір протоколу взаємодії є критичним етапом проєктування кіберфізичної системи з використанням БПЛА. Він має базуватися на особливостях середовища, завдань місії, технічних характеристиках апаратів і вимогах до точності, надійності та масштабованості. Застосування правильного підходу дозволяє реалізувати ефективні автоматизовані рішення для спостереження за інфраструктурою вітрової енергетики.

У ході проєктування кіберфізичної системи, що включає автономні БПЛА, GPS-навігацію з RTK-корекцією, засоби передачі даних і аналітичні алгоритми, було підтверджено її здатність забезпечувати високоточний обліт і ефективну інспекцію об'єктів вітроенергетичної інфраструктури.

Система здатна успішно реалізувати автономне планування маршрутів обльоту турбін з урахуванням геометрії об'єктів, зони обмеження польоту, рельєфу місцевості та технічних обмежень БПЛА. Планувальник місій, побудований на основі просторових координат та оптимізований відповідними алгоритмами (TSP, спіральний або радіальний обліт), забезпечив повне охоплення об'єктів без перетинів і зайвих повторів.

Використання RTK-модуля дозволило досягти сантиметрової точності позиціонування, а інтеграція даних з IMU забезпечила стабільність польоту навіть за наявності зовнішніх збурень. Обробка сенсорних даних здійснювалась із застосуванням фільтра Калмана, що зменшило вплив шуму в координатах та орієнтації.

Передача даних між БПЛА та наземною станцією відбувається стабільно завдяки застосуванню протоколу MAVLink у поєднанні з бездротовою mesh-мережею. Це дозволяє в режимі реального часу передавати зображення, телеметрію та повідомлення про стан польотного завдання.

Інформація, зібрана під час місій, аналізується автоматизованими засобами. Отримані 3D-моделі об'єктів, фотограмметричні карти та на основі цього змодельовано виявлення низки пошкоджень конструкцій (наприклад, тріщини лопатей, термічні аномалії). Алгоритми на базі штучного інтелекту здатні успішно

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ідентифікувати типи дефектів та оцінити їх критичність, що дозволяє використовувати цю систему для попереджувального технічного обслуговування.

Загалом, проведені дослідження свідчать про перспективність запропонованої системи, як для регулярного моніторингу, так і для швидкого виявлення несправностей на об'єктах альтернативної енергетики. Надалі можлива інтеграція з цифровими платформами обліку та прогнозування стану обладнання для побудови повноцінної інтелектуальної інспекційної інфраструктури.

					КвРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Liu Y., Peng Y., Wang B., Yao S., Liu, Z. Review on cyber-physical systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2017. Vol. 4(1). Pp. 27-40.
2. Ning H., Ye X., Bouras M. A., Wei D., Daneshmand M. General cyberspace: Cyberspace and cyber-enabled spaces. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. Vol. 5(3). Pp. 1843-1856.
3. De Micco L., Vargas F. L., Fierens P. I. A literature review on embedded systems. *IEEE Latin America Transactions*. 2019. Vol. 18(02). Pp.188-205.
4. Oks S. J., Fritzsche A., Möslein K. M. An application map for industrial cyber-physical systems. In *Industrial internet of things: Cybermanufacturing systems*. 2016. Pp. 21-46. Cham: Springer International Publishing.
5. Trevino M. Cyber physical systems. *Prism*. 2019. Vol. 8(3). Pp. 2-13.
6. Franke U. E. Military robots and drones. In *Routledge Handbook of Defence Studies*. 2018. Pp. 339-349.
7. Van der Merwe D., Burchfield D. R., Witt T. D., Price K. P., Sharda A. Drones in agriculture. *Advances in agronomy*, 2020. Vol. 162. Pp. 1-30.
8. Ciampa E., De Vito L., Rosaria Pecce M. Practical issues on the use of drones for construction inspections. In *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1249. No. 1. P. 012016. IOP Publishing.
9. Javaid M., Khan I. H., Singh R. P., Rab S., Suman, R. Exploring contributions of drones towards Industry 4.0. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*. 2022. Vol. 49(3). Pp. 476-490.
10. Cruzan M. B., Weinstein B. G., Grasty M. R., Kohn B. F., Hendrickson E. C., Arredondo T. M., Thompson P. G. Small unmanned aerial vehicles (micro-UAVs, drones) in plant ecology. *Applications in plant sciences*, 2016. Vol. 4(9). P.1600041.
11. Campana S. Drones in archaeology. State-of-the-art and future perspectives. *Archaeological Prospection*. 2017. Vol. 24(4). Pp. 275-296.
12. Rejeb A., Rejeb K., Simske S. J., Treiblmaier H. Drones for supply chain

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

management and logistics: a review and research agenda. *International Journal of Logistics Research and Applications*. 2023. Vol. 26(6). Pp. 708-731.

13. Grogan S., Pellerin R., Gamache M. (2018). The use of unmanned aerial vehicles and drones in search and rescue operations—a survey. *Proceedings of the PROLOG*, 1-13.

14. McDonald W. Drones in urban stormwater management: a review and future perspectives. *Urban Water Journal*. 2019. Vol. 16(7). Pp. 505-518.

15. Łukasik Z., Nowakowski W., Ciszewski T. Time server based on NMEA and SNTX Protocols. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2020. Vol. 14(2). Pp. 453-458.

16. Lee D. K., Miralles D., Akos D., Konovaltsev A., Kurz L., Lo S., Nedelkov F. Detection of GNSS spoofing using NMEA messages. In *2020 European Navigation Conference (ENC)*. 2020. Pp. 1-10.

17. Macario Barros A., Michel M., Moline Y., Corre G., Carrel F. A comprehensive survey of visual slam algorithms. *Robotics*. 2022. Vol. 11(1). P. 24.

18. Liang Y., Luan Y. X. The functional evolution of collembolan Ubx on the regulation of abdominal appendage formation. *Development genes and evolution*, 2024. Vol. 234(2). Pp.135-151.

19. Teunissen P. J. G., Khodabandeh A. Review and principles of PPP-RTK methods. *Journal of Geodesy*. 2015. Vol. 89(3). Pp. 217-240.

20. Pirtı A. Evaluating the accuracy of post-processed kinematic (PPK) positioning technique. *Geodesy and Cartography*. 2021. Vol. 47(2). Pp. 66-70.

21. Li S., Xu W., Li Z. Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges. *Geodesy and Geodynamics*. 2022. Vol. 13(2). Pp.114-126.

22. Shakeri R., Al-Garadi M. A., Badawy A., Mohamed A., Khattab T., Al-Ali A. K., Guizani M. Design challenges of multi-UAV systems in cyber-physical applications: A comprehensive survey and future directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21(4). Pp. 3340-3385.

23. Wang H., Zhao H., Zhang J., Ma D., Li J., Wei J. Survey on unmanned aerial

					КВПКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

vehicle networks: A cyber physical system perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 22(2). Pp. 1027-1070.

24. Darrah T., Biswas G., Frank J., Quiñones-Grueiro M., Teubert C. A data-centric approach to the study of system-level prognostics for cyber physical systems: Application to safe UAV operations. *Journal of Surveillance, Security and Safety*/ 2022. Vol. 3(2). Pp. 55-87.

25. Behroozpour B., Sandborn P. A., Wu M. C., Boser B. E. Lidar system architectures and circuits. *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55(10). Pp.135-142.

26. Kushnir D., Paramud Y. The algorithm of cyber-physical system targeting on a movable object using the smart sensor unit. *Cyber-Physical Systems*. 2020. Vol. 5(1). Pp. 16-22.

27. Park J., Kim C., Dinh M. C., Park, M. Design of a condition monitoring system for wind turbines. *Energies*. 2022. Vol. 15(2). P. 464.

28. Ahmed M. A., Eltamaly A. M., Alotaibi M. A., Alolah A. I., Kim Y. C. Wireless network architecture for cyber physical wind energy system. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 40180-40197.

29. Fursov I., Yamkovyi K., Shmatko O. Smart Grid and wind generators: an overview of cyber threats and vulnerabilities of power supply networks. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2022. Vol. 4. Pp.50-63.

30. Al Abdulwahid A. Cyber-physical threat mitigation in wind energy systems: a novel secure architecture for industry 4.0 power grids. *Energy Informatics*. 2024. Vol. 7(1). P. 141.

31. Svystun S., Melnychenko O., Radiuk P., Savenko O., Lysyi A. Distributed Intelligent System Architecture for UAV-Assisted Monitoring of Wind Energy Infrastructure. 2024. *arXiv preprint arXiv:2412.09387*.

32. Shakeri R., Al-Garadi M. A., Badawy A., Mohamed A., Khattab T., Al-Ali A. K., Guizani, M. Design challenges of multi-UAV systems in cyber-physical applications: A comprehensive survey and future directions. *IEEE Communications*

Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21(4). Pp. 3340-3385.

33. Jemmali M., Bashir A. K., Boulila W., Melhim L. K. B., Jhaveri R. H., Ahmad J. An efficient optimization of battery-drone-based transportation systems for monitoring solar power plant. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 24(12). Pp. 15633-15641.

34. Chen X., Eder M. A., Shihavuddin A. S. M. A concept for human-cyber-physical systems of future wind turbines towards Industry 5. *Authorea Preprints*. 2023.

35. Sánchez P. J. B., Ramirez I. S., Márquez F. P. G. Wind turbines acoustic inspections performed with UAV and sound frequency domain analysis. In *2021 7th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA)*. 2021. Pp. 1-5.

36. Badihi H., Zhang Y., Jiang B., Pillay P., Rakheja S. A comprehensive review on signal-based and model-based condition monitoring of wind turbines: Fault diagnosis and lifetime prognosis. *Proceedings of the IEEE*. 2022. Vol. 110(6). Pp. 754-806.

37. Ospina-Bohórquez A., López-Rebollo J., Muñoz-Sánchez P., González-Aguilera D. A digital twin for monitoring the construction of a wind farm. *Infrastructures*. 2023. Vol. 8(1). P. 10.

38. Schäfer B. E., Picchi D., Engelhardt T., Abel D. Multicopter unmanned aerial vehicle for automated inspection of wind turbines. In *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. 2016. Pp. 244-249.

39. Brossard M., Condomines J. P., Bonnabel S. Tightly coupled navigation and wind estimation for mini UAVs. In *2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. 2018. P. 1843.

40. Arafat M. Y., Alam M. M., Moh S. Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges. *Drones*. 2023. Vol. 7(2). P. 89.

41. Shafiee M., Zhou Z., Mei L., Dinmohammadi F., Karama J., Flynn D. Unmanned aerial drones for inspection of offshore wind turbines: A mission-critical failure analysis. *Robotics*. 2021. Vol. 10(1). P. 26.

42. Rao Y., Xiang B. J., Huang B., Mao S. Wind turbine blade inspection based

					КВПКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

on unmanned aerial vehicle (UAV) visual systems. In *2019 IEEE 3rd conference on energy internet and energy system integration (EI2)*. 2019. Pp. 708-713.

43. Car M., Markovic L., Ivanovic A., Orsag M., Bogdan S. Autonomous wind-turbine blade inspection using LiDAR-equipped unmanned aerial vehicle. *IEEE access*. 2020. Vol. 8. Pp. 131380-131387.

44. Ju C., Son H. I. Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation. *Electronics*. 2018. Vol. 7(9). P. 162.

45. Skorobogatov G., Barrado C., Salamí E. Multiple UAV systems: A survey. *Unmanned Systems*. 2020. Vol. 8(02). Pp. 149-169.

46. Erdelj M., Król M., Natalizio E. Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management. *Computer Networks*. 2017. Vol. 124. Pp. 72-86.

47. Bayram H., Stefas N., Engin K. S., Isler V. Tracking wildlife with multiple UAVs: System design, safety and field experiments. In *2017 International symposium on multi-robot and multi-agent systems (MRS)*. 2017. Pp. 97-103.

48. Ordoukhanian E., Madni A. M. Toward development of resilient multi-UAV system-of-systems. In *AIAA SPACE 2016*. 2016. P. 5414.

49. Chen Y., Liu X., Zhao N., Ding Z. Using multiple UAVs as relays for reliable communications. In *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*/ 2018. Pp. 1-5.

50. Fan B., Li Y., Zhang R., Fu Q. Review on the technological development and application of UAV systems. *Chinese Journal of Electronics*. 2020. Vol. 29(2). Pp. 199-207.

51. Tian Y., Liu K., Ok K., Tran L., Allen D., Roy N., How J. P. Search and rescue under the forest canopy using multiple UAVs. *The International Journal of Robotics Research*. 2020. Vol. 39(10-11). Pp. 1201-1221.

52. Wu Q., Zeng Y., Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018. Vol. 17(3). Pp. 2109-2121.

					КВПКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

53. Park J. H., Choi S. C., Ahn I. Y., Kim J. Multiple UAVs-based surveillance and reconnaissance system utilizing IoT platform. In *2019 International conference on electronics, information, and communication (ICEIC)*. 2019. Pp. 1-3.

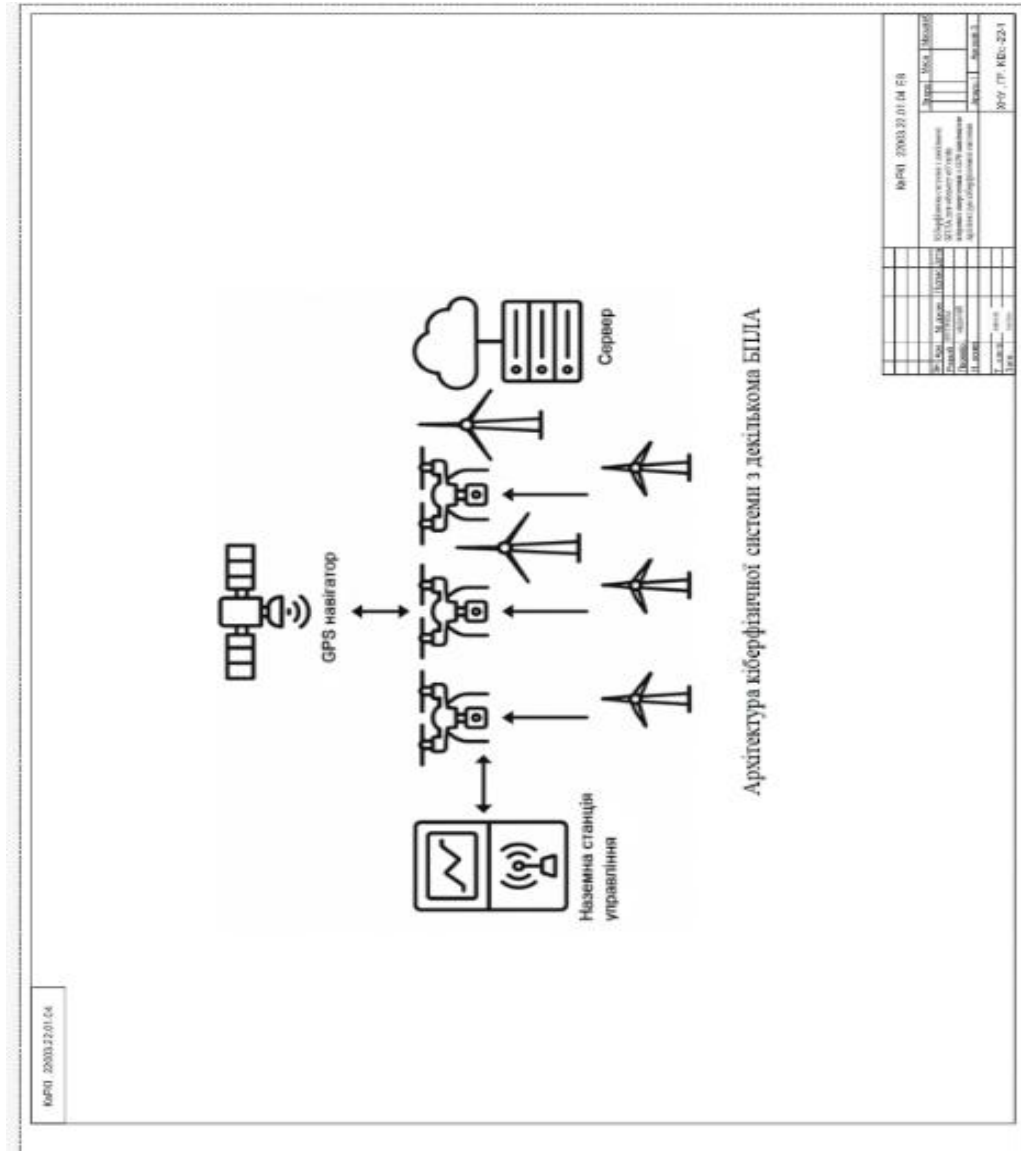
54. Yu Y., Guo J., Ahn C. K., Xiang Z. Neural adaptive distributed formation control of nonlinear multi-UAVs with unmodeled dynamics. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2022. Vol. 34(11). Pp. 9555-9561.

55. Pan Z., Zhang C., Xia Y., Xiong H., Shao X. An improved artificial potential field method for path planning and formation control of the multi-UAV systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2021. Vol. 69(3). Pp. 1129-1133.

					КВРКІ.22003.22.01.04 ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

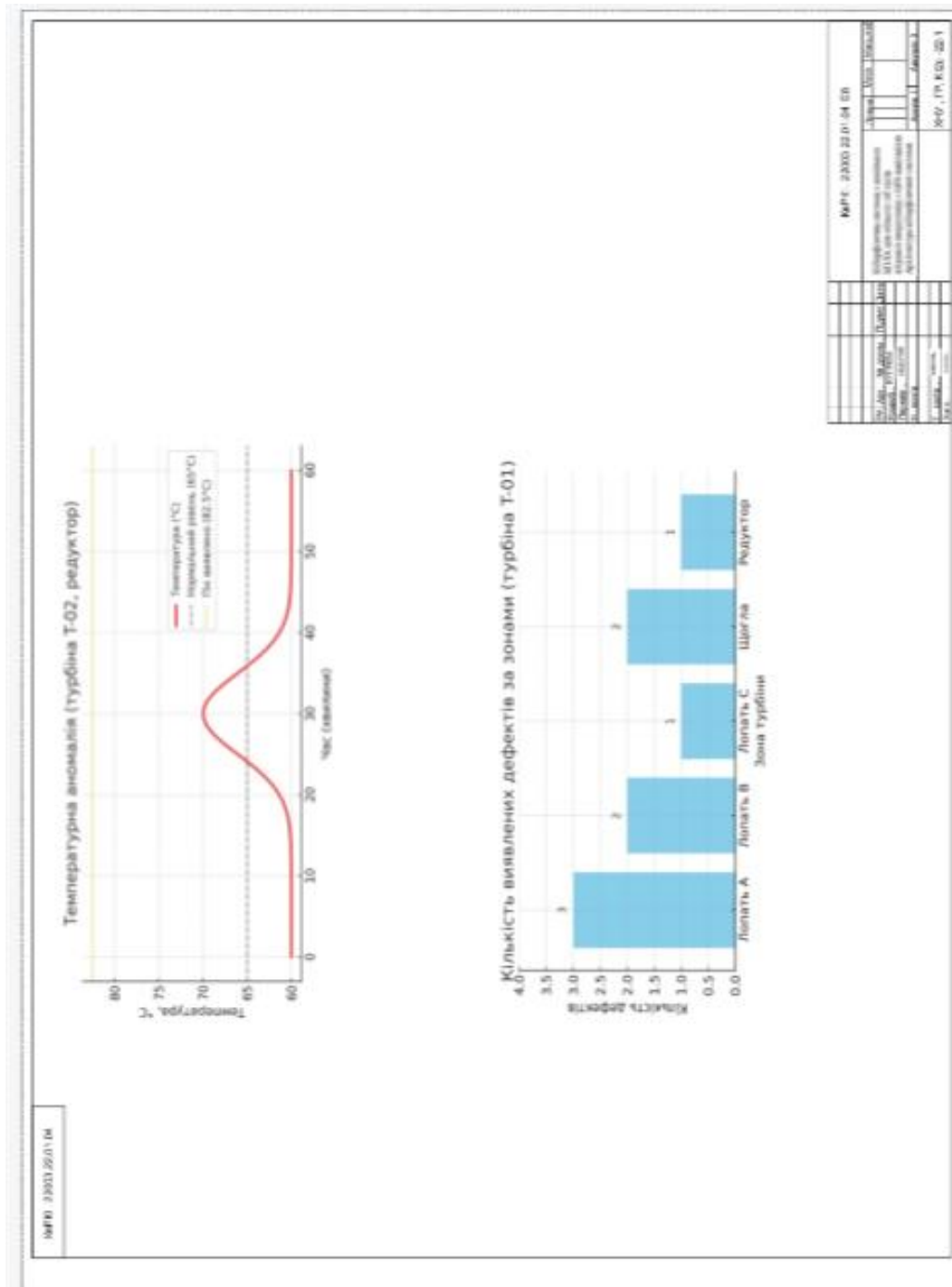
Додаток А (обов'язковий)

Копія креслення «Архітектура кіберфізичної системи з декількома БПЛА»



Додаток В (обов'язковий)

Копія креслення «Результати роботи кіберфізичної системи»



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: Віталій БУГРИМ

Співавтор:

Назва: Бугрим_Кіберфізична система з декількох БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики GPS навігацією

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 5.9%

Коефіцієнт подібності 2: 1.9%

Мікропробіли: 76

Заміна букв: 1

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-08 07:23:58.0

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), які передбачували 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:

2025-06-08

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 0.0%

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

ID: 244093 Title: БКР Кіберфізична система з декількох БПЛА для об'єкту об'єктів вітрової енергетики з GPS навігацією Added in a DB: 2025-06-08 Authors: Віталій БУГРІМ Heads: Дмитро МЕДЗАТНІЙ Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	102140	760	1105 (1%)	15 (2%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

A computer-generated document

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Бугрим Віталій Олегович

Тема: Кіберфізична система з декількома 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 60

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є автоматизація технічного моніторингу вітрових турбін з можливістю збору, передачі та обробки діагностичних даних шляхом розроблення кіберфізичної системи, заснованої на взаємодії декількох автономних БПЛА з GPS-навігацією.

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

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У межах розділу 1 було визначено основні поняття кіберфізичних систем, проведено огляд класифікації та характеристик безпілотних літальних апаратів, що дало змогу зрозуміти їх функціональні можливості, а також дізнатись про роль БПЛА як ключових компонентів сучасних кіберфізичних систем. Основна увага була зосереджена на тому, як параметри БПЛА впливають на архітектуру, логіку дій та ефективність у конкретних застосуваннях, зокрема в контексті автоматизованих, геопросторово-орієнтованих задач. У другому розділі розглянуто ключові аспекти організації взаємодії між безпілотними літальними апаратами у складі кіберфізичних систем, призначених для обльоту об'єктів вітрової енергетики. Система здатна успішно реалізувати автономне планування маршрутів обльоту турбін з урахуванням геометрії об'єктів, зони обмеження польоту, рельєфу місцевості та технічних обмежень БПЛА. Планувальник місій, побудований на основі просторових координат та оптимізований відповідними алгоритмами (TSP, спіральний або

радіальний обліт), забезпечив повне охоплення об'єктів без перетинів і зайвих повторів.

4. Позитивні сторони роботи: Загалом, проведені дослідження свідчать про перспективність запропонованої системи, як для регулярного моніторингу, так і для швидкого виявлення несправностей на об'єктах альтернативної енергетики. Надалі можлива інтеграція з цифровими платформами обліку та прогнозування стану обладнання для побудови повноцінної інтелектуальної інспекційної інфраструктури.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага приділена огляду існуючих методів опрацювання зібраної інформації за допомогою БПЛА.

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 достатньому технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно D (3,50)

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

Корецька Л.О., доцент кафедри АКИТтаР

"10" серпня 2025 р.

Ал (підпис)

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

Віталія БУГРИМА

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2с-22-1

ЗАЯВА

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

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

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

9 червня 2025 року



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

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

Назва: Кіберфізична система з декількома БПЛА для обльоту об'єктів вітрової енергетики з GPS-навігацією

Автор: Віталій БУГРИМ

Спеціальність: 123- Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Дмитро МЕДЗАТИЙ, к.т.н., доцент

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) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;

2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами;

3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 5.90% і адресується до 71 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС



Дмитро МЕДЗАТИЙ

Сергій ЛИСЕНКО

Ольга ПАВЛОВА