

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр

Освітній рівень

Кіберфізична системи динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів
вітрової енергетики з використанням БПЛА

Назва теми

КВРКІ 022001.22.02.26 ПЗ

Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

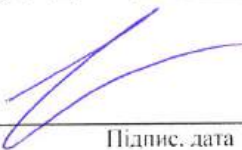
Виконав: студент III курсу, група КІ2с-22-2


Підпис

Олег БАЛІЦЬКИЙ

Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО

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

«__» 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

Баліцький Олег Іванович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична системи динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА

Керівник проекту (роботи) Мельниченко Олександр Вікторович д.ф., старший викладач.
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) _____

Процес збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики
Покращення якості динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА

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

Архітектура ПЗ проекту

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Апаратне забезпечення проекту

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

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

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 – теоретичні проблеми досліджуваної проблеми	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – архітектура системи адаптивного планування траєкторії БПЛА для об'єкту лопатей вітроенергетичних установок з урахуванням погодних умов	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація та тестування кіберфізичної системи	29.04.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2025	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент


Підпис

Олег БАЛІЦЬКИЙ
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична системи динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА».

Автор роботи: Баліцький Олег.

Керівник роботи: Мельниченко Олександр Вікторович.

Пояснювальна записка: 72 с., 21 рис., 5 табл., 4 дод., 42 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

Метою дипломної роботи є покращення якості динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА.

Об'єктом дослідження є процес збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрово енергетики .

Предметом дослідження є алгоритми, засоби та технології динамічного збору візуальних даних за допомогою БПЛА.

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






Підпис студента

30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

ЗМІСТ	2
ВСТУП	4
1 ТЕОРИТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ	5
1.1 Аналіз кіберфізичної системи динамічного збору даних	5
1.1.1 Особливості побудови архітектури.....	5
1.1.2 Алгоритм розпізнавання дефектів і візуальної аналітики	7
1.2 БПЛА як засіб динамічного збору візуальних даних.....	10
1.2.2 Комплекс критеріїв, вибірки дронів для обстеження вітрових турбін.....	10
1.2.2 Вибір найбільш придатної моделі БПЛА на основі аналізу сучасного ринку технологій.....	12
1.3 Висновок до першого розділу.....	18
2 АРХІТЕКТУРА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО ЗБОРУ ВІЗУАЛЬНИХ ДАНИХ ПРО ДЕФЕКТИ ОБ'ЄКТІВ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА	20
2.1 Метод автоматизації траєкторії обльоту БПЛА.....	20
2.2.1 Пріоритети ремонту та обслуговування	27
2.3 Вибір програмного забезпечення для обробки зображень з БПЛА.....	31
2.3.1 Бібліотека MMDetection	31
2.3.2 Архітектура та функціональні можливості MMDetection	32
2.4 Архітектурна модель компонента аналізу для коригування руху БПЛА	33
2.5 Технічне забезпечення для динамічного збору візуальних даних.....	36
2.5.1 Платформа для польотів.....	36
2.5.2 Вибір системи навігації	37
2.5.3 Обладнання для пошуку пошкоджень об'єктів вітрової енергетики	40
2.6 Висновки до другого розділу	42

КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Кіберфізична система динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		О. БАЛІЦЬКИЙ				у	2	73
Перевір.		О. МЕЛЬНИЧЕНКО		30.05.24				
Н. контр.		Тетяна КИСІЛЬ		30.05.24				
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		30.05.24				
ХНУ КІ2с-22-2								

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ	44
3.1 Опис програмного та апаратного забезпечення кіберфізично системи	44
3.1.1 Метод мультиспектральних зображень ВЕУ	47
3.2 Реалізація системи динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів.....	50
3.2.1 Аналіз результатів експериментальних досліджень та порівняння з традиційними методами	50
3.2.2 Аналіз точності виявлення дефектів на злитих зображеннях та RGB	55
3.2.3 Аналіз обмежень розробленої кіберфізичної системи	62
3.3 Висновки до третього розділу	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	68
ДОДАТОК А	74
ДОДАТОК Б.....	75
ДОДАТОК В.....	76
ДОДАТОК Г.....	77

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку альтернативної енергетики особливе значення набуває ефективне обслуговування об'єктів вітрової енергетики. Вітрова енергетична установка, будучи технічно складними системами, потребують регулярного моніторингу з метою своєчасного виявлення дефектів, які можуть призвести до зниження ефективності або аварійного виходу з ладу. Традиційні методи інспекції, як правило, є трудомісткими, небезпечними для персоналу та не забезпечують необхідної точності та оперативності.

Одним із перспективних підходів до вирішення цієї проблеми є використання кіберфізичних систем, що інтегрують апаратні засоби, програмне забезпечення та засоби штучного інтелекту. Зокрема, безпілотні літальні апарати (БПЛА) відкривають нові можливості для динамічного збору візуальних даних, дозволяючи здійснювати автоматизований моніторинг важкодоступних елементів вітрових турбін у реальному часі.

Актуальність даного дослідження полягає в необхідності створення ефективної та надійної кіберфізичної системи, здатної виконувати інспекцію об'єктів вітрової енергетики за допомогою БПЛА, обробляти зібрані мультиспектральні зображення та автоматично ідентифікувати дефекти з використанням сучасних методів глибокого навчання. Такий підхід дозволяє не лише підвищити точність діагностики, а й зменшити витрати на обслуговування та знизити ризики технічних несправностей.

Метою дипломної роботи є розробка архітектури кіберфізичної системи динамічного збору візуальних даних для виявлення дефектів вітрових турбін, а також оцінка ефективності її функціонування в умовах реального застосування.

Об'єктом дослідження є процес збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики. Предметом дослідження є алгоритми, технічні засоби та інформаційні технології, що забезпечують ефективний моніторинг стану вітроенергетичних установок за допомогою БПЛА.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕОРИТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

1.1 Аналіз кіберфізичної системи динамічного збору даних

1.1.1 Особливості побудови архітектури

Упродовж останніх десятиліть спостерігається інтенсивне зростання використання відновлюваних джерел енергії, зокрема вітрової, що зумовлює необхідність удосконалення процесів технічного обслуговування та забезпечення ефективної експлуатації відповідного обладнання. Вітрові турбіни, які є ключовими елементами вітроенергетичних систем, створюють значні виклики через свої великі габарити та складну механічну конструкцію. З плином часу ці установки можуть зазнавати деградації у вигляді тріщин на лопатях та механічних ушкоджень, що негативно впливає на їх продуктивність або спричиняє повну зупинку. Несвоєчасне виявлення таких несправностей може призвести до істотних фінансових витрат і втрат обсягів виробництва електроенергії, що підкреслює потребу у надійних та безперервних системах моніторингу.

Традиційні методи перевірки, зокрема ручний візуальний огляд або наземна діагностика, часто є недостатньо ефективними, оперативними та економічно доцільними. Такі підходи можуть бути трудомісткими, потребувати значних часових ресурсів та створювати ризики для персоналу у зв'язку з важкодоступністю оглядових зон. Використання безпілотних літальних апаратів у поєднанні з сучасними технологіями обробки візуальних даних дозволяє реалізувати автоматизовані підходи до інспекції. Ці рішення сприяють виявленню дефектів у режимі реального часу, що, своєю чергою, дозволяє скоротити час простою обладнання та продовжити його експлуатаційний ресурс.

Попри значні досягнення в цій сфері, сучасні автоматизовані системи моніторингу мають певні обмеження, зокрема недостатню масштабованість, обмежену здатність до обробки даних у реальному часі та ускладнення, пов'язані з інтеграцією даних від різних типів сенсорів. Це зумовлює потребу у створенні

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтелектуальної системи, яка здатна динамічно здійснювати збір та аналіз візуальної інформації, інтегрувати показники від декількох сенсорів та ефективно функціонувати в умовах великомасштабних вітрових електростанцій.

З метою вирішення зазначених проблем у цьому дослідженні запропоновано архітектуру інтелектуальної системи, призначеної для підвищення ефективності процесів збору та обробки візуальних даних у режимі реального часу, що забезпечує своєчасне виявлення дефектів в інфраструктурі відновлюваної енергетики, зокрема вітрових турбін. Запропонована система базується на використанні безпілотних літальних апаратів, оснащених візуальними та тепловізійними камерами, і впровадженні сучасних алгоритмів для комплексного аналізу технічного стану енергетичного обладнання (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Вітроенергетична установка під тепловізійною камерою

Розподілена архітектура забезпечує синхронну роботу ключових компонентів, таких як БПЛА, системи керування та сенсорні пристрої, що дозволяє досягти надійної роботи в умовах великих об'єктів генерації електроенергії. Актуальність створення ефективних систем моніторингу та діагностики полягає у своєчасному виявленні дефектів з метою запобігання аварійним ситуаціям та забезпечення безперервної експлуатації обладнання. Традиційні методи, зокрема ручні огляди та наземне обстеження, дедалі більше втрачають актуальність через недостатню ефективність, високу вартість та ризики для персоналу. У зв'язку з цим зростає інтерес до впровадження сучасних технологій, таких як БПЛА, багатосенсорні системи та методи глибокого навчання у практику технічної

діагностики. У низці досліджень розглядалося застосування БПЛА для інспекції вітрових турбін. Зокрема, було запропоновано рішення на основі аналізу візуальних та теплових зображень для виявлення таких дефектів, як тріщини на лопатях. Незважаючи на покращення точності, такі системи мали обмеження, пов'язані із залежністю від одного типу візуалізації, що могло призводити до пропуску певних видів ушкоджень. Упровадження згорткових нейронних мереж (CNN) у поєднанні з БПЛА дало змогу підвищити точність виявлення поверхневих дефектів, однак такі рішення часто ґрунтувалися лише на даних одного сенсора, що не забезпечувало повної діагностичної картини.

Для збору тривимірної візуальної інформації про стан об'єктів відновлюваної енергетики необхідно впровадити комплексну систему, яка об'єднує інструменти з різним функціональним призначенням. З урахуванням просторових особливостей об'єктів доцільно використовувати географічно розподілені ресурси, забезпечуючи їх взаємодію за допомогою сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Основною вимогою до такої системи є можливість автоматизованого управління всіма її компонентами, що забезпечить зручність для кінцевих користувачів. Структура запропонованої системи включає різноманітні елементи, представлені на загальній схемі. Їх кількість, типи та територіальний розподіл істотно впливають на роботу всієї системи, тому ключові завдання на етапі проектування мають бути зосереджені на забезпеченні узгодженої взаємодії та досягненні оптимальної ефективності використання ресурсів.

1.1.2 Алгоритм розпізнавання дефектів і візуальної аналітики

Активне впровадження вітроенергетики як одного з основних джерел сталої енергетики зумовило широке розміщення вітрових турбін у різноманітних, подекуди важкодоступних регіонах. Ефективне та безперервне функціонування таких установок потребує систематичного технічного обслуговування, що включає ретельну діагностику стану обладнання з метою вчасного виявлення можливих пошкоджень або дефектів. Традиційні засоби перевірки, серед яких слід відзначити

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

візуальні інспекції вручну та методи канатного доступу, характеризуються високими витратами ресурсів, потенційною небезпекою для персоналу і обмеженою здатністю до оцінки конструкцій складної конфігурації, притаманної ВЕУ.

Останнім часом безпілотні літальні апарати (БПЛА) посіли провідне місце серед сучасних технологій інспекції, пропонуючи мобільні платформи, здатні адаптуватися до зовнішніх умов та виконувати високоточне зондування об'єктів. БПЛА знаходять застосування не лише в енергетиці, але й у таких сферах, як контроль за станом лісових масивів, агрономічний моніторинг і картографування. У контексті огляду вітрових турбін вони дають змогу отримати детальні зображення з високою роздільною здатністю, включаючи зони, що зазвичай є недоступними або ризикованими для огляду з участю людини.

Незважаючи на зазначені переваги, існує низка викликів, пов'язаних із впливом агресивного навколишнього середовища, внаслідок чого турбіни зазнають поступового фізичного зносу. Основними типами пошкоджень виступають ерозійні процеси, утворення тріщин, деламінація та ураження блискавкою. Оперативне виявлення подібних дефектів є надзвичайно важливим для запобігання аварійним ситуаціям та втратам у виробництві електроенергії. Разом з тим, складна геометрія турбін, особливо їх лопатей, ускладнює реалізацію повноцінного огляду засобами традиційних методів.

Застосування БПЛА, оснащених мультиспектральними сенсорами, зокрема камерами тепловізійного та RGB-типу, відкриває нові можливості для діагностики. Тепловізійні сенсори дозволяють виявляти аномалії температурного поля, які можуть свідчити про приховані дефекти або внутрішню деградацію матеріалів. У свою чергу, RGB-камери забезпечують високоякісну візуалізацію зовнішніх пошкоджень, дозволяючи зафіксувати найдрібніші деталі. Проте обидва типи камер мають свої обмеження: тепловізори схильні до зниження якості зображення в залежності від погодних умов, а RGB-камери не здатні фіксувати температурні відхилення.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці фактори обумовлюють необхідність інтеграції обох типів зображень. Комбіновані зображення, отримані шляхом об'єднання теплових і RGB-даних, дозволяють досягти балансу між високою деталізацією та виявленням прихованих аномалій. Таке поєднання сприяє підвищенню точності діагностики та створює передумови для більш ефективного функціонування систем інспекції.

У цьому контексті глибоке навчання (DL), зокрема згорткові нейронні мережі (CNN), відіграє ключову роль. Вони здатні автоматично ідентифікувати й класифікувати дефекти на основі аналізу візуальних даних, демонструючи високу ефективність у завданнях виявлення об'єктів і семантичної сегментації. Однак об'єднання мультиспектральних зображень у рамках таких моделей створює низку технічних викликів - від синхронізації та просторового вирівнювання до обробки великої кількості інформації в режимі реального часу.

Виявлення поверхневих дефектів: За допомогою RGB-камер здійснюється детальна візуальна оцінка поверхні лопатей, що дозволяє ідентифікувати тріщини, ерозійні пошкодження та механічні деформації. Для цього використовуються CNN-моделі, які автоматично визначають пошкоджені ділянки на основі візуального патерну.

Виявлення температурних аномалій: Тепловізійні камери дають змогу виявити аномальні теплові сигнатури, які часто є ознакою внутрішніх структурних дефектів, таких як деламінація чи локалізоване підвищення тертя.

Інтегроване мультиспекральне виявлення: Поєднання RGB та інфрачервоних зображень дозволяє створити композитні карти дефектів, що враховують як зовнішні, так і внутрішні прояви пошкоджень. Це дає змогу системі враховувати більше контексту під час аналізу та покращує загальну точність.

Розпізнавання за допомогою навчання з переносом: Застосування попередньо навчених моделей із донавчанням на специфічних даних про вітротурбіни дозволяє досягти високих результатів навіть за обмеженої кількості даних.

Термографічне виявлення з підвищеною точністю: Розробляються методики активної термографії, які дозволяють з підвищеною точністю діагностувати

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приховані дефекти, хоча їх ефективність зростає при комбінованому використанні з RGB-візуалізацією.

Попри наявні розробки, значна кількість досліджень залишає поза увагою повноцінне поєднання мультиспектральних даних та складні умови експлуатації великих ВЕУ. Існуючі рішення часто обмежуються застосуванням одного типу сенсора або не враховують необхідності високоточного просторового вирівнювання даних.

У цьому дослідженні запропоновано підхід, який спрямований на усунення вищезазначених обмежень за рахунок розробки нової методики мультиспектрального складання зображень з урахуванням просторової корекції та мінімізації помилок прив'язки. Крім того, система базується на сучасних фреймворках DL для обробки складених зображень, що дозволяє підвищити точність і надійність ідентифікації дефектів. Завдяки мобільності БПЛА та можливості інтеграції з географічно розподіленими системами, запропонований підхід має потенціал для масштабування на великі об'єкти зеленої енергетики.

1.2 БПЛА як засіб динамічного збору візуальних даних

1.2.2 Комплекс критеріїв, вибірки дронів для обстеження вітрових турбін

Інспекція лопатей вітрових турбін є критично важливою для забезпечення ефективної та безпечної експлуатації обладнання. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, стали надійним інструментом для таких перевірок, адже дозволяють швидко, безпечно й з мінімальними витратами отримати детальну інформацію про технічний стан турбін. Проте вибір відповідного дрона вимагає ретельного аналізу – ця задача значно складніша, ніж може здатися на перший погляд.

Одним із першочергових факторів є комерційна доцільність. Якісний промисловий дрон може коштувати до 25 тисяч доларів США. Деякі власники вітропарків обирають один апарат для обслуговування кількох об'єктів – на перший

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

погляд, це здається економним рішенням. Проте надмірна економія може обернутися значними втратами: побутові дрони, хоч і значно дешевші, не мають ані відповідного програмного забезпечення, ані достатньої стабільності під час польоту, ані камер із високою роздільною здатністю, необхідних для точного виявлення дефектів.

Безпека є ще одним визначальним аспектом. Політ поблизу лопатей турбін – надзвичайно складне завдання, що вимагає не лише точного керування, а й професіоналізму пілота. Попри те, що Федеральне авіаційне управління США (FAA) надає базову сертифікацію, специфічних вимог до операторів, які працюють на вітропарках, часто немає. Відсутність належної підготовки може призвести до серйозних аварій. Наприклад, помилка аматора може спричинити зіткнення з лопаттю турбіни, що обійдеться в десятки тисяч доларів на ремонт.

Тому дрон повинен бути не лише сертифікованим, а й надійно захищеним від зовнішніх впливів. Робота на вітрових електростанціях часто супроводжується вітром, дощем, пилом або снігом. У таких умовах бажано використовувати апарати з класом захисту не нижче IP55. Крім того, дрон має здатність стабільно зависати в повітрі навіть при сильних поривах – лише за такої умови можна отримати чіткі та точні зображення.

Надійність керування також відіграє ключову роль. Далеко не всі дрони мають стабільний радіозв'язок на великій відстані або в умовах перешкод. Наприклад, система управління наземної станції MACH 4 працює на частоті 1,4 ГГц, що дозволяє забезпечити стабільний контроль навіть за складних умов.

Не менш важливими є характеристики оптики. Камера має бути високої роздільної здатності, бажано з 4К-зйомкою, оптичним зумом і передачею зображення в реальному часі у форматі не нижче 1080p. Такий функціонал дозволяє виявляти навіть незначні тріщини, подряпини або сліди ерозії на лопатях. Крім того, камера повинна мати можливість змінювати кут огляду в процесі польоту, забезпечуючи повноцінний огляд на 360 градусів.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тривалість польоту без підзарядки безпосередньо впливає на ефективність інспекції. Більшість професійних моделей працюють від 20 до 30 хвилин, однак флагманські дрони здатні триматися в повітрі до 45 хвилин і більше, що дозволяє охопити більшу кількість турбін за один виліт.

Таким чином, вибір дрона для інспекції вітрових турбін є багатофакторним завданням. Він вимагає врахування не лише технічних характеристик, але й особливостей умов експлуатації, досвіду пілота, рівня автоматизації, стійкості до погодних умов і якості зображення. Тільки комплексний підхід дозволяє забезпечити точну, безпечну й економічно доцільну інспекцію.

1.2.2 Вибір найбільш придатної моделі БПЛА на основі аналізу сучасного ринку технологій

Altura Zenith ATX8 – це надійний дрон від компанії Aerialtronics, який вирізняється високою стійкістю до зовнішніх впливів. Завдяки сертифікації IPX5 (TÜV), ця модель захищена від дощу й вологи, а конструкція з вісьмома двигунами та резервними модулями навігації забезпечує підвищену надійність. Під час тестів двигуни дрона відпрацювали 720 годин безперервного польоту без жодної відмови. Зовнішній вигляд моделі зображений на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд Altura Zenith ATX8

Він здатний розвивати максимальну швидкість до 72 км/год і має максимальну злітну вагу 8,5 кг, з яких до 2,9 кг може становити корисне

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаження. Час безперервного польоту сягає 35 хвилин, що дозволяє виконувати завдання на значній площі без частих перерв на заміну акумуляторів. Дрон стійкий до вітру зі швидкістю до 16 м/с, що забезпечує його ефективну роботу навіть у несприятливих погодних умовах, таких як легкий дощ або сніг.

Управління здійснюється за допомогою 12-канального RF контролера, підтримується функція автоматичного повернення додому та використовується GPS-навігація, що сприяє високій точності виконання польотних завдань.

Основними перевагами Altura Zenith ATX8 є висока надійність, здатність протистояти сильним поривам вітру, маневреність і точність. Водночас, до недоліків слід віднести високу вартість пристрою, необхідність проходження спеціального навчання для операторів, а також великі габарити дрона, що ускладнює транспортування та логістику.

Altura Zenith ATX8 є потужним та надійним інструментом для виконання інспекцій у складних умовах завдяки своїй високій вантажопідйомності, тривалому часу польоту та здатності працювати в різноманітних погодних умовах. Це ідеальний вибір для компаній, які потребують ефективного та безпечного виконання завдань на великих відстанях. Однак висока ціна та вага можуть бути факторами, які варто враховувати при виборі цього дрону для великомасштабних операцій.

Skydio X10 є представником новітнього покоління автономних дронів, що поєднують в собі штучний інтелект, компактний дизайн і надійність роботи навіть в екстремальних умовах. Цей дрон створений спеціально для завдань, де потрібне високе технічне оснащення, зокрема в галузі моніторингу інфраструктури, енергетичних об'єктів і вітрових турбін. Його ключова перевага – це інтелектуальна система управління, що базується на потужному графічному процесорі NVIDIA Jetson Orin. Це дає змогу дрону самостійно планувати маршрут, уникати перешкод і виконувати завдання з мінімальним залученням оператора(рис 1.3).

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд Skydio X10

Він здатен досягати максимальної швидкості 72 км/год, а його тривалість польоту становить до 40 хвилин. Завдяки рейтингу захисту IP55, дрон демонструє стійкість до води та пилу, що робить його придатним для використання під час легкого дощу або снігу.

Модель оснащена тепловізійним сенсором Teledyne FLIR Boson+ з роздільною здатністю 640×512 пікселів і чутливістю 30 мК, що забезпечує високу якість зображення навіть в умовах обмеженої видимості. Вбудований графічний процесор NVIDIA Jetson Orin дозволяє виконувати обробку даних на борту та реалізовувати функції автономного польоту, що значно розширює можливості дрона у складних сценаріях.

Серед переваг Skydio X10 варто відзначити його надзвичайну автономність, високу якість візуалізації та модульну конструкцію, яка дозволяє адаптувати дрон до різних задач. Водночас, до недоліків належить висока ціна пристрою та обмежена вантажопідйомність, що може зменшити гнучкість використання в деяких операціях.

Skydio X10 є високотехнологічним і ефективним рішенням для інспекцій у складних умовах завдяки своїй автономності, здатності до ухилення від перешкод і тривалому часу польоту. Це ідеальний вибір для компаній, які шукають надійного і безпечного помічника для виконання інспекцій в обмежених або складних умовах.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак його висока ціна та обмежений діапазон можуть бути факторами, які варто враховувати при виборі цього дрону для великомасштабних операцій

IF1200 – це потужний комерційний дрон від компанії IdealAero, призначений для інспекцій вітрових турбін та інших важливих інфраструктурних об'єктів. Цей дрон оснащений високоякісними камерами та іншими інструментами для ефективного моніторингу та аналізу, працюючи в складних погодних умовах. Зовнішній вигляд моделі зображено на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд IF1200

Він здатен перебувати в повітрі до 45 хвилин і розвивати швидкість до 22 м/с. Завдяки ступеню захисту IP56, дрон демонструє високу стійкість до впливу води та пилу, що робить його надійним інструментом для роботи у складних погодних умовах.

Дрон оснащений багатофункціональними камерами, тепловізійними сенсорами та системою LiDAR, що дозволяє отримувати високоточні дані для аналізу об'єктів і територій. Підтримка функцій автономного польоту, автоматичного повернення додому та стабільного передавання даних забезпечує ефективність виконання завдань навіть за мінімальної участі оператора.

До переваг IF1200 належать широкий набір сенсорів для комплексного збору інформації, здатність працювати в несприятливих погодних умовах та автономні функції, що знижують залежність від людини. Разом із цим, основними недоліками

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

є висока вартість дрона, значна вага конструкції та потреба в спеціальній підготовці операторів для ефективного використання пристрою.

F1200 є надійним і високопродуктивним рішенням для інспекцій у складних умовах, зокрема для вітрових турбін. Його високі технічні характеристики та функції автономного керування роблять його потужним інструментом для ефективного виконання завдань на великих відстанях. Однак висока вартість і вага можуть обмежити використання цього дрону деякими компаніями

DJI Mavic 3 Enterprise – компактна платформа для базових RTK-інспекцій. Бюджетний варіант для не надто вимогливих умов. Зовнішній вигляд зображено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд DJI Mavic 3 Enterprise

У стандартному режимі він здатен розвивати швидкість до 15 м/с, а в спортивному -до 21 м/с. Завдяки легкій конструкції та зручному форм-фактору, дрон є портативним і придатним для швидкого розгортання на місцевості.

Модель оснащується двома основними конфігураціями камер: Mavic 3E із 20 МП 4/3 CMOS сенсором і механічним затвором для картографування, а також Mavic 3T, що додатково має 12 МП телеоб'єктив із 56× гібридним зумом і тепловізійну камеру з роздільністю 640×512 пікселів. Інтегрований RTK-модуль забезпечує високу точність позиціонування -до 1 см по горизонталі та 1.5 см по вертикалі.

До головних переваг DJI Mavic 3 Enterprise належать тривалий час польоту (до 45 хвилин), доступна вартість у порівнянні з більш важкими промисловими

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

моделями, а також компактність і мобільність. Разом із цим, дрон має обмеження за вагою корисного навантаження, що обмежує встановлення додаткового обладнання, а також зберігає залежність від погодних умов, що варто враховувати при плануванні місії.

DJI Mavic 3 Enterprise є потужним та універсальним інструментом для виконання різноманітних комерційних завдань. Його висока якість зйомки, точне позиціонування та довгий час польоту роблять його ідеальним вибором для професіоналів у галузях, де необхідна точність та ефективність. Однак висока ціна та обмеження за вагою можуть бути факторами, які слід враховувати при виборі цього дрону.

Найефективніший дрон для інспекцій вітрових турбін залежить від специфіки вашої задачі.

У процесі вибору найбільш ефективного дрона для інспекції вітрових турбін важливо враховувати низку практичних чинників, що визначають функціональність апарата в реальних умовах експлуатації.

По-перше, ключову роль відіграють погодні умови та навколишнє середовище. Якщо інспекції проводяться в регіонах із сильними вітрами, опадами чи іншими несприятливими факторами, найкращими варіантами є Altura Zenith ATX8 та Skydio X10. Ці моделі відзначаються високою вітростійкістю -відповідно до 16 м/с і до 40 м/с, що дозволяє виконувати завдання навіть у складній метеорологічній ситуації без ризику втрати стабільності польоту.

Ще одним важливим критерієм є тривалість автономної роботи. Дрони Altura Zenith ATX8 і DJI Mavic 3 Enterprise забезпечують політ до 40–45 хвилин, що є оптимальним показником для обстеження масштабних об'єктів без необхідності частотої заміни акумулятора чи переривання місії.

Не менш значущим є фактор маневреності та габаритів. У цьому контексті DJI Mavic 3 Enterprise має перевагу завдяки своїм компактним розмірам і малій вазі. Це забезпечує легкість транспортування та швидке розгортання, а також дозволяє

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проводити інспекції в умовах обмеженого простору -наприклад, поблизу вузьких майданчиків або між конструкційними елементами турбіни.

Якщо для конкретного завдання вирішальне значення мають автономія та мінімізація людського втручання, найбільш доцільним вибором буде Skydio X10. Цей дрон відзначається надзвичайно високим рівнем автономності завдяки системам штучного інтелекту, що дозволяють самостійно виконувати складні маневри, уникати перешкод і зменшувати навантаження на оператора.

Щодо технічних можливостей для інспекції, то Altura Zenith ATX8 має найширші функціональні можливості серед усіх згаданих моделей. Він підтримує використання широкого спектра сенсорів і камер -зокрема, тепловізорів, мультиспектральних сенсорів та інструментів аналізу матеріалів -що дає змогу проводити як поверхневу, так і глибинну діагностику стану лопатей та інших компонентів вітрових турбін. Завдяки цьому Altura є універсальним рішенням для об'єктів із різними технічними вимогами до обстеження.

1.3 Висновок до першого розділу.

Аналіз використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для інспекції вітрових турбін показав їх значний потенціал у підвищенні ефективності моніторингу технічного стану обладнання. Завдяки можливості застосування мультиспектральної візуалізації, зокрема тепловізійних і RGB-камер, БПЛА здатні здійснювати комплексну діагностику та виявляти дефекти на різних етапах експлуатації турбін, що дає можливість своєчасно реагувати на проблеми і запобігати їхньому розвитку до критичних масштабів.

Одним з основних переваг використання БПЛА є значне зменшення витрат часу і коштів на проведення інспекцій, особливо в умовах важкодоступних територій, де традиційні методи потребують застосування важкої техніки або залучення персоналу до виконання ризикованих операцій на великій висоті. Використання БПЛА дозволяє здійснювати моніторинг у реальному часі та

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оперативно виявляти дефекти, що значно підвищує безпеку і знижує ймовірність аварійних ситуацій.

Інтеграція технологій глибокого навчання для автоматизації аналізу зібраних даних відкриває нові можливості для підвищення точності та швидкості виявлення дефектів. Це дозволяє мінімізувати людський фактор і скоротити час, необхідний для виконання інспекцій. Водночас розвиток алгоритмів для обробки великих обсягів даних сприяє вдосконаленню системи моніторингу, що дає змогу ефективно управляти ресурсами і підтримувати оптимальний технічний стан вітрових турбін.

Таким чином, застосування безпілотних літальних апаратів у процесах інспекції вітрових турбін є високоефективним і перспективним підходом, що дозволяє не лише забезпечити високий рівень безпеки та надійності, але й знизити витрати на обслуговування та покращити загальний процес моніторингу і технічного обслуговування вітрових турбін.

Якщо ваша мета - інспекція ВЕУ, то DJI Matrice 300 RTK є найкращим вибором через свою потужність, стабільність та можливість використання різноманітних сенсорів, що підвищує точність збору даних. Він підходить для професійних завдань, де важлива висока точність і тривалий час роботи. Це не лише один з найбільш надійних дронів, але й універсальний у використанні для різних видів інспекцій, включаючи мультиспектральну візуалізацію, що важливо для таких завдань, як перевірка стану ВЕУ.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АРХІТЕКТУРА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО ЗБОРУ ВІЗУАЛЬНИХ ДАНИХ ПРО ДЕФЕКТИ ОБ'ЄКТІВ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА

2.1 Метод автоматизації траєкторії обльоту БПЛА

Вітроенергетичні установки представляють собою складні інженерні споруди з компонентами нестандартної форми та великих розмірів. Вони часто розташовуються у важкодоступних районах або на значній висоті, що створює істотні труднощі під час проведення інспекцій та контролю технічного стану. У зв'язку з цим ефективним підходом до діагностики ВЕУ є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які дають змогу здійснювати детальне обстеження й виявлення дефектів усіх елементів конструкції, навіть в умовах обмеженого доступу.

Зазвичай інспекція ВЕУ за допомогою БПЛА виконується вручну, тобто оператор самостійно керує дроном у процесі обльоту. Такий підхід потребує значних затрат часу й ресурсів, а також залежить від досвіду та кваліфікації фахівця, що може призводити до похибок при фіксації параметрів пошкоджень - тріщин, слідів корозії або ознак перегріву. Щоб зменшити вплив людського чинника й підвищити точність та об'єктивність оцінки стану обладнання, необхідно впроваджувати автоматизовані технології.

Одним із ключових напрямів автоматизації є розробка підходів до автономного планування маршруту польоту БПЛА під час обстеження неробочих компонентів ВЕУ. Такий підхід передбачає побудову ефективного методу, який дозволяє формувати траєкторії обльоту, орієнтовані на оптимальний збір візуальної інформації. При цьому необхідно враховувати як геометричні особливості, так і фізичні властивості елементів конструкції. Загальний принцип реалізації запропонованого методу представлено на рисунку 2.1, де наведено основні етапи його реалізації.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

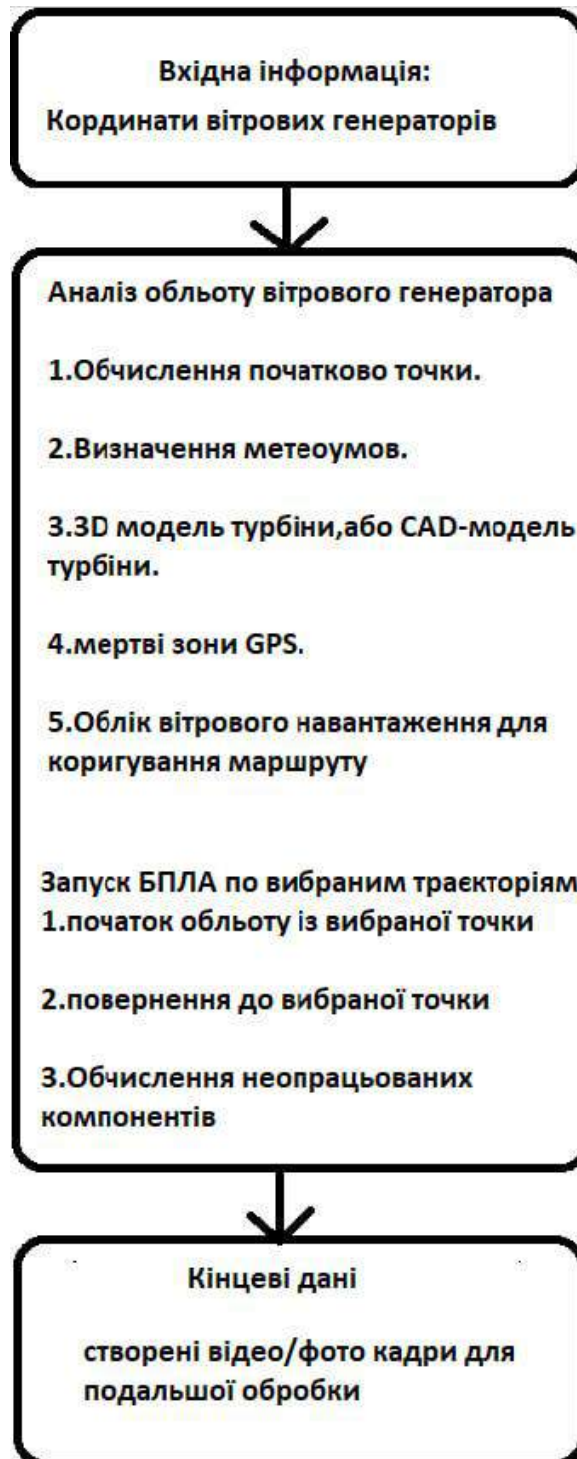


Рисунок 2.1 – Структура автоматизованого визначення траєкторії БПЛА

Сутність запропонованого підходу полягає в тому, що під час планування та виконання об'льоту беруться до уваги геометричні особливості лопаті та інших компонентів ВЕУ. Зокрема, необхідно постійно коригувати кут нахилу камери

відносно поверхні об'єкта в кожній точці маршруту, що забезпечує отримання якісних зображень усіх зон інтересу.

Запропонований метод автоматичного планування траєкторії обльоту безпілотного літального апарата (БПЛА) ґрунтується на врахуванні просторових характеристик конструктивних елементів вітроенергетичної установки (ВЕУ), зокрема лопатей. Геометрична складність лопатей, їх вигнута форма, довжина та нахил обумовлюють необхідність динамічного коригування кута огляду камери на кожному етапі польоту. Це дозволяє фіксувати високоякісні візуальні дані, мінімізуючи мертві зони огляду та забезпечуючи повноцінне охоплення поверхні для виявлення потенційних дефектів.

Такий підхід має низку важливих переваг. По-перше, забезпечується стабільна якість зображень усіх поверхонь, зокрема у складнодоступних ділянках. По-друге, метод дозволяє уникнути повторних обльотів та скоротити загальний час інспекції. По-третє, автономне планування траєкторій сприяє зменшенню навантаження на оператора та підвищенню ефективності польотної місії.

Особливу увагу в межах запропонованого методу приділено адаптації параметрів польоту до конкретних особливостей об'єкта. Наприклад, під час обстеження лопатей враховується не лише форма та розміри, але й тип пошкоджень, які можуть бути характерними для певних ділянок - від ерозії країв до тріщин у основі. Це дозволяє інтелектуальній системі пріоритизувати зони огляду та змінювати швидкість або відстань до об'єкта в реальному часі.

Крім того, у структурі алгоритму передбачена можливість інтеграції попередніх даних інспекцій, що дозволяє оптимізувати маршрут на основі історичних результатів, автоматично оновлюючи траєкторії в разі виявлення нових дефектів. Подібний підхід є ключовим для впровадження предиктивного обслуговування, коли інспекція не лише фіксує поточний стан обладнання, але й прогнозує можливі зони виникнення дефектів у майбутньому. Впровадження подібних автоматизованих рішень у сфері технічного моніторингу ВЕУ значно розширює потенціал цифровізації обслуговування енергетичних об'єктів,

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сприяючи зниженню витрат на обслуговування, підвищенню безпеки персоналу, а також забезпеченню стабільної роботи енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії. Система управління польотом побудована на модульному принципі й складається з кількох функціональних блоків.

Блок навігації, який забезпечує позиціонування дрона в просторі з використанням GPS, IMU та, за необхідності, візуальної SLAM-навігації для точного орієнтування поблизу об'єкта. Планувальний модуль, що відповідає за побудову оптимальної траєкторії з урахуванням форми та положення компонентів ВЕУ, а також поточних погодних умов. Модуль стабілізації та орієнтації, який керує положенням платформи й камери, зберігаючи заданий кут нахилу об'єктива до інспектованої поверхні. Сенсорний модуль, який об'єднує дані з камери високої роздільної здатності, термодатчиків, та, за потреби, мультиспектральних сенсорів. Комунікаційний блок, що забезпечує двосторонній обмін даними між БПЛА та наземною станцією, а також підтримку автономного режиму у разі втрати зв'язку.

Процес формування траєкторій умовно поділяється на кілька послідовних етапів. Геометричне моделювання об'єкта - побудова 3D-моделі ВЕУ або її елементів (наприклад, лопатей) на основі САД-даних, хмар точок чи попередніх знімків. Ініціалізація контрольних точок - автоматичне визначення ключових позицій, які мають бути охоплені камерою. Ці точки формуються з урахуванням вигину лопаті, її довжини, кута атаки та зон, уразливих до дефектів. Розрахунок оптимальної відстані та кута огляду - для кожної точки розраховується положення дрона в просторі з урахуванням кута огляду камери (FoV), глибини різкості та допустимої похибки позиціонування. Генерація траєкторій - побудова криволінійної траєкторії, яка з'єднує всі ключові точки, забезпечуючи плавний рух БПЛА, мінімізацію різких поворотів та уникнення зіткнень з конструктивними елементами установки. Оптимізація маршруту - застосування алгоритмів типу spline-інтерполяції з урахуванням енергоспоживання, тривалості польоту та безпеки.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спеціалізовану методику оцінювання критичності, яка базується на аналізі візуальних характеристик ушкоджень і застосуванні елементів нечіткої логіки.

Метод передбачає кілька ключових етапів. На першому кроці зображення, отримані від безпілотників, проходять обробку для виявлення дефектів. Далі для кожного об'єкта визначаються точні параметри – розміри, контури, площа, температура (у разі використання тепловізійних камер). Ці параметри перетворюються на так звані нечіткі множини, які дозволяють враховувати невизначеність або варіативність у даних, наприклад: «ймовірно критичний», «швидше за все безпечний» тощо.

На другому етапі система створює окрему множину експертних оцінок для кожного типу пошкоджень. Такі оцінки ґрунтуються на знаннях спеціалістів і результатах попередніх спостережень. Наприклад, тріщина довжиною понад 1 метр на лопаті майже завжди оцінюється як критична.

Далі обчислюється ступінь збігу між параметрами, які виявила система, та експертними оцінками. Для цього використовується коефіцієнт узгодженості, який відображає наскільки близькі між собою результати: від 0 (повна розбіжність) до 1 (повне співпадіння). Цей показник є важливим для формування зваженого підходу, в якому об'єктивні дані з БПЛА та суб'єктивні оцінки фахівців гармонійно поєднуються.

На основі коефіцієнта узгодженості система розраховує вагові коефіцієнти для кожного дефекту. Ці ваги дозволяють збалансовано врахувати вплив обох джерел інформації: вимірних характеристик та думки експертів.

Після цього проводиться об'єднання всіх даних, що дає змогу отримати єдину підсумкову оцінку критичності для кожного об'єкта. Для переходу від нечіткої множини до конкретного числа (тобто до реального показника критичності) використовується процедура дефазифікації. Найчастіше застосовується метод центру ваги, який дозволяє визначити точне числове значення критичності - наприклад, 4.8 за п'ятибальною шкалою.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виявлення дефектів на елементах вітроенергетичних установок (ВЕУ) - лише перший крок у забезпеченні їх надійної експлуатації. Значно важливішим із практичної точки зору є визначення того, які з пошкоджень становлять реальну загрозу безпеці або ефективності роботи турбіни. Саме для цього у рамках дослідження розроблено удосконалений метод оцінки критичності дефектів, що базується на комбінації машинного аналізу даних та елементів експертного підходу.

Основна ідея методу полягає в тому, щоб на підставі візуальних ознак ушкоджень – таких як форма, розмір, площа, інтенсивність кольору або температури (в разі тепловізійного обстеження) – сформуванати оціночний показник, який відображає ступінь небезпеки. Для зменшення впливу невизначеності використовується апарат нечіткої логіки, що дозволяє уникнути жорсткого поділу дефектів на «небезпечні» й «безпечні», натомість надаючи гнучкий діапазон критичності (наприклад: «низька», «середня», «висока» критичність).

Оцінювання здійснюється за багатьма параметрами. Наприклад, для тріщин враховуються:

- 1) довжина та глибина пошкодження;
- 2) його орієнтація (поздовжня чи поперечна щодо напрямку вітру);
- 3) місце розташування (на краю лопаті, ближче до основи, біля кріплень тощо);
- 4) динаміка розростання (якщо доступна інформація з попередніх обстежень);

Для температурних аномалій оцінюється:

- 1) перевищення температури над середнім значенням;
- 2) симетрія нагріву (одностороння локалізація часто вказує на дефект);
- 3) взаємозв'язок температурних зон із геометрією конструкції.
- 4) Удосконаленням запропонованого підходу є введення багаторівневої оцінки, де система не лише формує загальний показник критичності, а й розділяє його за напрямками ризику - наприклад: механічна загроза, теплова нестабільність,

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ризик поширення тріщини. Це дозволяє фахівцям оперативно визначити тип дії: провести терміновий ремонт, встановити додатковий моніторинг або запланувати профілактичну зупинку.

Ще однією важливою складовою системи є можливість накопичення історії дефектів. Завдяки базі даних, яка зберігає попередні результати обстежень, система може не лише оцінювати поточний стан, а й прогнозувати розвиток дефекту. Якщо, наприклад, на одному й тому ж місці з року в рік з'являється схожа тріщина, то навіть за її невеликого розміру система може присвоїти їй вищу критичність через наявність історії деградації.

Крім того, розроблений підхід дозволяє адаптуватися до різних типів ВЕУ. Архітектура системи оцінювання критичності побудована так, що її можна переналаштувати для різних моделей турбін з урахуванням відмінностей у конструкції лопатей, висоті щогли, типі матеріалів або географічному розміщенні вітропарку.

На завершення, варто підкреслити, що розроблений метод не лише підвищує точність визначення стану обладнання, але й оптимізує процес ухвалення технічних рішень. У поєднанні з іншими компонентами кіберфізичної системи - такими як планування маршруту обльоту, мультиспектральне зображення та моделі глибокого навчання - цей підхід формує комплексну аналітичну платформу для високоточної та безпечної експлуатації об'єктів вітроенергетики.

2.2.1 Пріоритети ремонту та обслуговування

У процесі технічного обслуговування складних інженерних систем, таких як вітрові турбіни або інфраструктура, що контролюється за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), одним із ключових завдань є визначення черговості реагування на виявлені дефекти. Оскільки ресурси (час, персонал, фінанси) є обмеженими, необхідно розробити ефективну стратегію пріоритезації ремонтних

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

робіт, яка дозволить мінімізувати ризики виходу з ладу критичних компонентів і забезпечити стабільну роботу об'єкта в цілому.

Визначення пріоритетів обслуговування базується насамперед на оцінці критичності виявлених дефектів. При цьому враховуються такі фактори, як характер пошкодження, ймовірність його розвитку, можливі наслідки для безпеки та стабільності функціонування обладнання, а також історія технічного обслуговування конкретного елемента. Наприклад, тріщина в несучій конструкції може на перших етапах не знижувати ефективність роботи системи, проте становить значний ризик у разі подальшої експлуатації, тому має отримати найвищий пріоритет щодо ремонту.

Сучасні системи технічної діагностики дедалі частіше використовують алгоритми автоматичної класифікації й пріоритезації пошкоджень. Завдяки використанню технологій комп'ютерного зору, штучного інтелекту та аналізу даних із сенсорів такі системи здатні не лише виявляти дефекти, але й автоматично оцінювати рівень загрози, який ті становлять. На основі цієї оцінки формується черговість технічного обслуговування, що дозволяє оперативно реагувати на найнебезпечніші випадки.

Контекст експлуатації відіграє не менш важливу роль у визначенні пріоритетності ремонтів. Зокрема, у період, коли очікується підвищене навантаження на обладнання – наприклад, у сезон сильних вітрів, що є типовим для вітроенергетики, – першочергову увагу приділяють тим вузлам і компонентам, від яких безпосередньо залежить стабільність та безперервність роботи всієї системи. Однак технічні чинники – це лише частина картини. На ухвалення рішення впливають і практичні аспекти: доступність необхідних запасних частин, можливість оперативного доступу до місця пошкодження, погодні умови, а також економічна доцільність втручання в конкретний момент часу. Такий комплексний підхід дозволяє не лише знижувати ризики простою, а й забезпечувати більш раціональне використання ресурсів, об'єднуючи технічну ефективність із гнучкістю та адаптивністю управлінських рішень(рис 2.2).

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

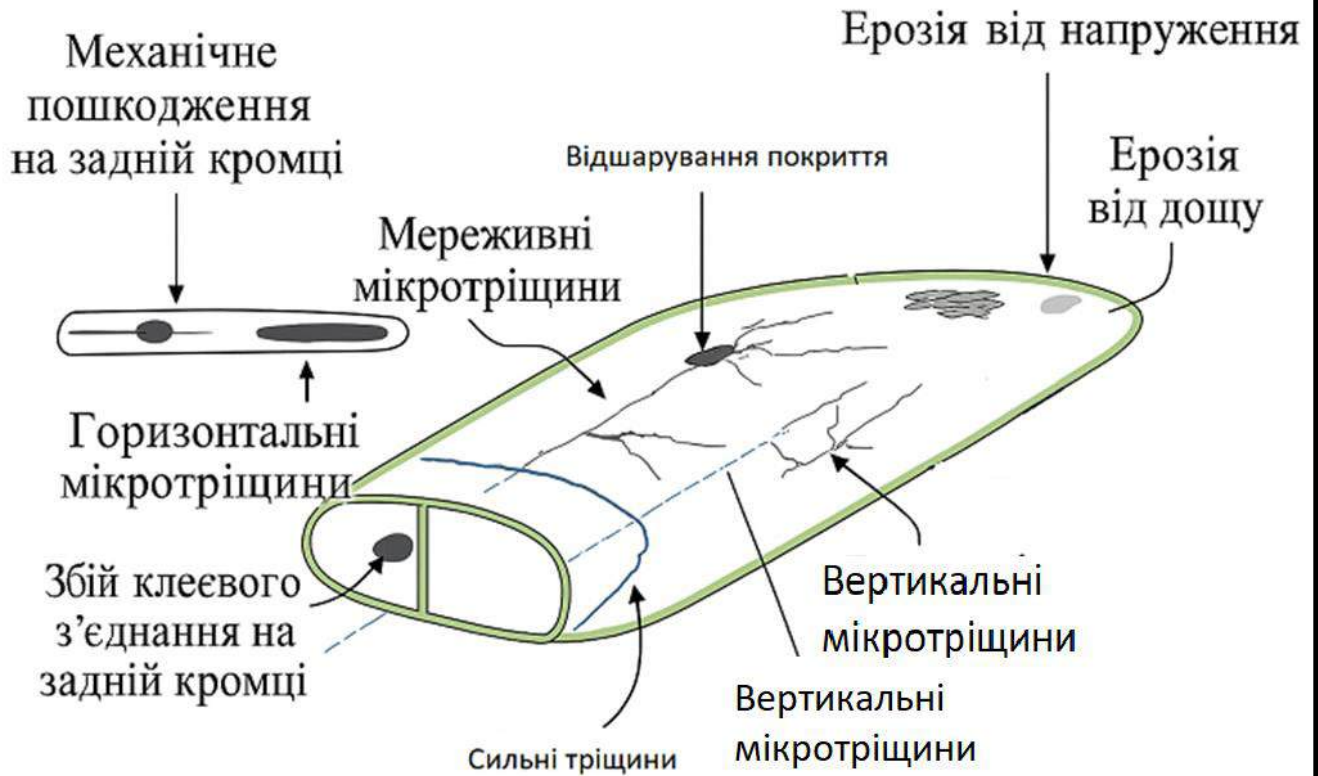


Рисунок – 2.2 Типи поверхневих дефектів лопаті

На зображенні можна побачити кілька типових ушкоджень, характерних для лопатей вітрових турбін. Одним із найчастіших є механічне пошкодження задньої кромки. Такі дефекти зазвичай виникають унаслідок дії сторонніх предметів, а також через обертовий вплив пилу, піску чи інших твердих частинок, які з часом призводять до ерозії поверхні.

Ще одним поширеним типом пошкодження є розшарування покриття та поява стресових тріщин. Вони формуються внаслідок циклічних навантажень, температурних коливань і вібрацій під час роботи турбіни. Особливо небезпечні ці процеси в зоні з'єднань матеріалів або біля ділянок зі складною геометрією.

Ураження дощем також є типовим, переважно для передньої кромки лопаті, яка найбільше піддається впливу атмосферних факторів. Постійне стирання крапель на великій швидкості поступово руйнує зовнішній шар, що в перспективі може призвести до глибших структурних пошкоджень.

Мікротріщини – як поперечні, так і вертикальні, сигналізують про початкові етапи деградації матеріалу. Хоча на перший погляд вони можуть здаватися

незначними, у разі ігнорування вони мають тенденцію до поширення і перетворення на серйозні тріщини з ризиком руйнування лопаті.

Також варто відзначити ще один критичний дефект ,збій клеєвих швів. Вони можуть спричинити розшарування сегментів лопаті, що суттєво знижує її міцність і аеродинамічні характеристики.

Найбільш поширеним та небезпечним із цих дефектів, згідно з практичними спостереженнями, є саме механічне ушкодження в області задньої кромки. Причина в тому, що ця частина має найменшу площу контакту з повітрям, але при цьому приймає на себе значну частку тиску внаслідок змінного навантаження. До того ж у цьому регіоні часто проходить конструкційний перехід між кореневою секцією та тілом лопаті, що створює додаткову концентрацію напружень і робить цю ділянку вразливою до пошкоджень.

Основними чинниками, що провокують механічні пошкодження, є удари та зіткнення під час перевезення, встановлення чи обслуговування. Такі дефекти часто мають не лише поверхневий характер, а можуть поширюватись углиб структури лопаті – аж до ламінованих внутрішніх шарів.

Окрему увагу слід приділити серйозним тріщинам, які здатні проростати з внутрішніх шарів поблизу зони максимальної хорди та поширюватися в напрямку передньої кромки. Ці тріщини зазвичай орієнтовані перпендикулярно до осі лопаті. Їх поява часто пов'язана з особливостями аеродинамічного навантаження – саме в зоні максимальної хорди концентруються найбільші втомні напруження під час роботи турбіни. Наразі не існує однозначного підтвердження, що такі тріщини напряду викликані механічним пошкодженням – однак незалежно від їх походження, вони вважаються висококритичними через ризик структурного руйнування.

З огляду на це, алгоритм оцінки критичності виявлених дефектів має враховувати не лише їхні розміри та глибину, а й геометричне положення відносно важливих конструктивних вузлів – таких як клейові з'єднання, зона максимального аеродинамічного навантаження чи точки кріплення армуючих елементів. Зокрема,

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пошкодження в кореневій частині або в зоні передньої кромки можуть мати вищу критичність, ніж аналогічні дефекти на периферії лопаті.

Ці типи ушкоджень автоматично ідентифікуються системою візуального моніторингу, після чого кожен з них оцінюється за критичністю відповідно до описаного вище методу. Наприклад, виявлення вертикальних тріщин поблизу основи чи збій у передньому клеєвому з'єднанні зазвичай призводить до високої оцінки критичності, оскільки ці дефекти прямо загрожують цілісності лопаті.

Таким чином, правильна побудова системи пріоритетів обслуговування є критично важливою складовою загальної стратегії технічного менеджменту. Вона дозволяє підвищити надійність обладнання, скоротити простої та оптимізувати використання ресурсів. У рамках дипломної роботи така система може бути розроблена як модель, що інтегрує результати автоматичного виявлення дефектів БПЛА, їх критичність, історичні дані, а також чинники ризику, і на основі цього формує впорядкований план дій.

2.3 Вибір програмного забезпечення для обробки зображень з БПЛА

2.3.1 Бібліотека MMDetection

Для інспекції об'єктів, було здійснено аналіз сучасних фреймворків глибокого навчання, призначених для задач комп'ютерного зору. Серед наявних рішень особливу увагу було приділено фреймворку MMDetection, який є одним із найефективніших та найгнучкіших інструментів для виявлення об'єктів, сегментації та класифікації зображень.

MMDetection – це потужна бібліотека з відкритим вихідним кодом, розроблена дослідницькою спільнотою OpenMMLab. Вона базується на глибокій модульній архітектурі та підтримує широкий спектр моделей для вирішення задач:

- 1) об'єктного виявлення (Object Detection);
- 2) інстанс-сегментації (Instance Segmentation);
- 3) семантичної та паноптичної сегментації.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливою перевагою MMDetection є його інтеграція з фреймворком PyTorch, що дозволяє легко модифікувати моделі, тренувати їх на власних датасетах та застосовувати для обробки зображень, отриманих із дронів.

2.3.2 Архітектура та функціональні можливості MMDetection

Архітектура фреймворку MMDetection побудована на принципі модульності, що дозволяє конфігурувати та поєднувати окремі компоненти нейронних мереж. Основні складові архітектури включають:

Backbone - базова частина нейромережі, яка відповідає за вилучення ознак з вхідних зображень. Підтримуються такі моделі, як ResNet, EfficientNet, MobileNet, Swin Transformer тощо. Neck – проміжний модуль для агрегації ознак з різних рівнів глибини. Найчастіше використовується Feature Pyramid Network (FPN), PANet та інші. RPN (Region Proposal Network) – компонент, що генерує регіони-претенденти на об'єкти на зображенні, які потім аналізуються більш детально. ROI Head - модуль, який виконує точну класифікацію та локалізацію об'єктів в межах запропонованих регіонів. У моделях сегментації (наприклад, Mask R-CNN) також використовується для створення масок об'єктів. BBox Head - головний модуль, який виконує передбачення координат об'єктів (bounding boxes) та їхніх класів. Loss Functions - набір функцій втрат, що використовуються для оптимізації моделі під час навчання, зокрема SmoothL1 Loss, CrossEntropy Loss, Focal Loss, GIoU Loss.

Крім основної архітектури моделей, фреймворк надає потужні функціональні можливості. Data pipeline - система передобробки та аугментації даних. Забезпечує завантаження, масштабування, обрізку, перевертання, нормалізацію зображень та інші трансформації. Config system - гнучкий механізм конфігурацій на базі Python.

Користувач має змогу створювати власні конфігурації або наслідувати існуючі шаблони. Модуль оцінювання (Evaluation) – підтримка метрик, таких як mean Average Precision (mAP), Intersection over Union (IoU), Precision/Recall, confusion matrix тощо. Підтримка розширень - інтеграція з іншими фреймворками: MMYOLO (для YOLO-сумісних моделей), MMTracking (для трекінгу об'єктів),

MMDeploy (для експорту та розгортання моделей), MMCV (базова бібліотека утиліт).

Завдяки вищезазначеним перевагам, MMDetection дозволяє створювати кастомізовані рішення для обробки зображень з дронів як у лабораторних умовах, так і безпосередньо в польових середовищах.

MMDetection підтримує понад 100 архітектур для задач об'єктного виявлення та сегментації. До найпоширеніших належать:

- 1) Faster R-CNN - двоетапна модель з високою точністю виявлення;
- 2) Mask R-CNN - розширення Faster R-CNN з можливістю побудови масок об'єктів;
- 3) RetinaNet - ефективна одноступенева модель з Focal Loss;
- 4) YOLO-серії - через підтримку в рамках MMYOLO;
- 5) Cascade R-CNN, FCOS, ATSS, DETR, DINO – представники сучасних підходів до обробки зображен.

Особливої уваги заслуговують легкі архітектури (наприклад, на основі MobileNet або EfficientNet), які є оптимальними для використання на дронах з обмеженими обчислювальними потужностями (Jetson Nano, Jetson Xavier NX тощо).

Фреймворк дозволяє використовувати зображення у довільному форматі, зокрема з камер дронів (RGB, мультиспектральні). Для цього передбачено можливість створення кастомного датасету з відповідною структурою, а також адаптацію нейронмережевої архітектури під вхід з нестандартною кількістю каналів. MMDetection підтримує формати анотацій COCO, Pascal VOC, а також дозволяє створити власну схему анотацій у форматі JSON або CSV.

2.4 Архітектурна модель компонента аналізу для коригування руху БПЛА

У рамках реалізації системи автономної інспекції об'єктів із застосуванням безпілотних літальних апаратів, особливу роль відіграє модуль метеоаналізу, який

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує адаптацію траєкторії польоту відповідно до змін погодних умов. Метою створення такого модуля є підвищення безпеки, надійності збору даних та ефективності використання ресурсів дрона.

Архітектура модуля метеоаналізу складається з наступних функціональних підсистем:

Інтелектуальна метеоадаптивна система навігації БПЛА включає кілька ключових функціональних компонентів. Перш за все, підсистема збору метеорологічних даних забезпечує отримання інформації з відкритих API, таких як OpenWeatherMap чи UAV Forecast, а також із бортових сенсорів, зокрема барометрів, анемометрів, гігрометрів, термометрів і GPS. За потреби підтримується інтеграція з локальними метеостанціями. Отримані дані передаються до підсистеми прогнозування ризиків, яка аналізує вітрове навантаження з урахуванням граничних значень для конкретної моделі дрона, визначає ділянки з високою ймовірністю опадів, туману або обмерзання, а також виявляє потенційні турбулентності за змінами атмосферного тиску та щільності повітря.

Далі ці дані використовуються алгоритмом адаптації маршруту, який формує оптимальний шлях із урахуванням векторів вітру, температурних зон і обхідних ділянок. Реалізація може базуватися на алгоритмі Дейкстри, адаптованих до мапи з ризиковими ваговими коефіцієнтами. Крім того, система здатна динамічно коригувати маршрут у реальному часі в разі зміни погодних умов чи появи нових ризиків.

Для забезпечення керування застосовується інтерфейс взаємодії з автопілотом, який інтегрується з платформами PX4 або ArduPilot через протокол MAVLink. Через нього надсилаються оновлені координати, параметри висоти та швидкості, а також отримується телеметрія для зворотного контролю за станом польоту(рис 2.3).

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.3 – Структурна схема модуля

Модуль дозволяє досягти таких переваг. Зменшення аварійності за рахунок уникнення ризикованих погодних умов. Підвищення точності збору даних, завдяки стабільному польоту. Автономність дрону в умовах мінливої погоди. Інтеграція з модулями комп'ютерного зору (MMDetection) – наприклад, у разі виявлення перешкод або зон ризику, маршрут може бути перебудований не лише на основі погоди, а й на основі аналізу зображень.

Розроблений модуль метеоаналізу є невід'ємною частиною автономної навігації БПЛА в умовах реального середовища. Його архітектура забезпечує гнучке зчитування, аналіз та інтерпретацію метеоумов у реальному часі, що дозволяє ефективно коригувати траєкторію дрона в польоті. Синергія цього модуля з обчислювальним ядром обробки зображень (на базі MMDetection) дозволяє реалізувати повноцінну автономну систему інспекції.

2.5 Технічне забезпечення для динамічного збору візуальних даних

2.5.1 Платформа для польотів

У якості льотної платформи для реалізації поставлених завдань було обрано безпілотний літальний апарат Altura Zenith ATX8 – це високотехнологічний мультикоптер із вертикальним зльотом і посадкою, який вирізняється надійною інженерною конструкцією, високою стабільністю у польоті та широкими можливостями адаптації до різних умов експлуатації. Завдяки цим характеристикам він ефективно використовується для виконання завдань моніторингу, інспекції, картографування, а також збору наукових даних у важкодоступних або небезпечних зонах.

Модель Altura Zenith ATX8 має восьмиротору схему (октокоптер), що забезпечує не лише підвищену стійкість під час польоту, але й дає змогу зберігати керованість у разі часткової відмови одного або навіть декількох двигунів. Це особливо важливо для виконання критично важливих місій, де надійність системи є ключовою вимогою. Конструктивно апарат виконано з використанням сучасних композитних матеріалів – зокрема, карбонового волокна, що поєднує високу механічну міцність із низькою питомою вагою. Це дозволяє зменшити загальну масу платформи та збільшити її тривалість перебування у повітрі.

Модульна архітектура конструкції забезпечує гнучкість конфігурації: окремі елементи можуть бути легко замінені або адаптовані до конкретних завдань, зокрема шляхом встановлення спеціалізованих сенсорів, мультиспектральних камер, тепловізорів, лазерних далекомірив тощо.

Для забезпечення максимальної точності позиціонування та стабільного керування польотом Altura Zenith ATX8 комплектується сучасною інерціальною та супутниковою навігаційною системою з підтримкою GNSS, що є критично важливим для автономного або напіваавтономного виконання складних польотних місій із заданим маршрутом та з мінімальним залученням оператора (рис. 2.4).

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

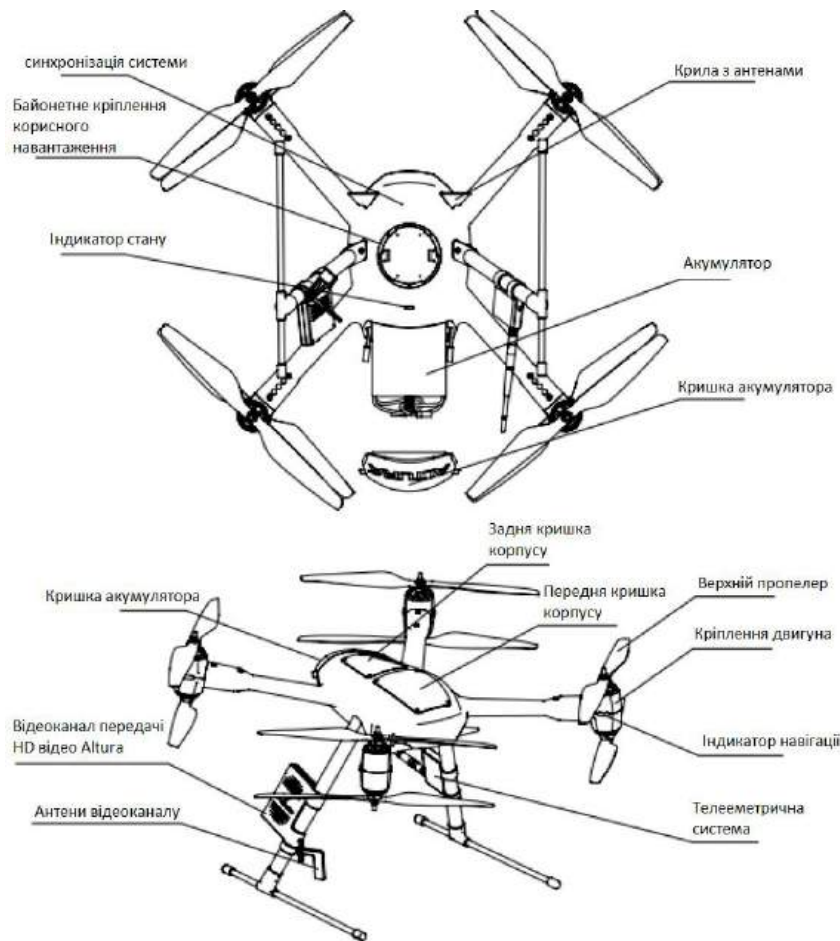


Рисунок – 2.4 Схема дрона Altura Zenith ATX8

2.5.2 Вибір системи навігації

Перше що нам потрібно вибрати це GNSS модуль – являють собою електронні пристрої, призначені для визначення просторового положення об'єкта шляхом обробки сигналів, що надходять від супутників глобальних навігаційних систем. Аббревіатура GNSS розшифровується як Global Navigation Satellite System і охоплює всі сучасні супутникові навігаційні системи, зокрема американську GPS, європейську Galileo, китайську BeiDou, а також деякі регіональні системи. Основне призначення таких модулів полягає в отриманні координат місцезнаходження, швидкості переміщення, висоти над рівнем моря та точного часу на основі аналізу сигналів від кількох супутників одночасно. Одним із поширених рішень є модуль u-blox NEO-M8N, який підтримує роботу з кількома глобальними навігаційними системами, такими як GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou. Цей модуль забезпечує

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

визначення координат з точністю приблизно до двох з половиною метрів і має частоту оновлення даних до десяти герц. Завдяки високій чутливості та підтримці диференціальної корекції (DGPS), він застосовується для моніторингу стану об'єктів та контролю їх розташування.

Для задач, які потребують більшої точності позиціонування, наприклад, для контролю встановлення або обслуговування вітрових турбін, можна використовувати модуль u-blox ZED-F9P, який підтримує технологію RTK (Real-Time Kinematic) і дозволяє досягати сантиметрової точності. Цей модуль відрізняється підвищеною частотою оновлення даних до двадцяти герц та одночасною роботою з усіма основними GNSS-системами, що забезпечує стабільність і надійність навігації в складних умовах.

Враховуючи динамічність і специфіку процесів монтажу та обслуговування вітрових турбін, найбільш доцільним є використання модулю u-blox ZED-F9P, який забезпечує високу частоту оновлення даних та підтримує технологію RTK для досягнення сантиметрової точності позиціонування. Це дозволяє оперативно коригувати місцезнаходження обладнання та підвищує ефективність і безпеку виконання робіт. Таким чином, застосування саме цього GNSS-модуля відкриває широкі можливості для підвищення точності та надійності контролю над об'єктами вітрової енергетики на всіх етапах їх життєвого циклу(рис 2.5).



Рисунок 2.5 – GNSS-модуль u-blox ZED-F9P

Для безпілотного літального апарата Altura Zenith ATX8 існує кілька варіантів лідарних систем, які широко застосовуються у задачах інспекції та картографування. Одним із найпопулярніших є YellowScan Surveyor. Цей пристрій забезпечує високу точність вимірювань, що досягає приблизно 4 сантиметрів, а також підтримує RTK/PPK корекції для покращення позиціонування. Лідар має мульти-ретурн лазерний сенсор, що дозволяє отримувати детальні тривимірні моделі навіть у складних умовах, наприклад, при наявності рослинності. Компактні розміри і невелика вага роблять його сумісним із платформою Altura Zenith ATX8, що робить його зручним вибором для польотів із високою точністю.

Іншим відомим варіантом є Velodyne Puck VLP-16, який характеризується 16 каналами сканування та радіусом дії до 100 метрів. Цей пристрій має частоту обертання до 20 Гц, що дозволяє швидко збирати дані з оглядом на 360 градусів по горизонталі. Вага близько 830 грамів робить його сумісним із багатьма типами дронів, включно з Altura Zenith ATX8. Цей лідар часто використовується для автономної навігації та створення карт місцевості.

Ще одним високотехнологічним пристроєм є RIEGL miniVUX-1UAV, який вирізняється великою дальністю сканування – до 900 метрів, а також високою точністю. Вага цього пристрою становить близько 860 грамів, і він оснащений вбудованими системами GNSS та інерційної навігації, що забезпечують точну геоприв'язку даних. Цей лідар широко застосовується для детального моделювання та інспекції інфраструктурних об'єктів.

Новітні пристрої Livox Mid-40 та Mid-100 пропонують широку зону сканування з кутом до 70 градусів по вертикалі та 38.4 градусів по горизонталі. Вони відзначаються порівняно низькою вагою, приблизно від 500 до 600 грамів, а також привабливою вартістю. Ці пристрої забезпечують велику щільність точок і підходять для завдань автономної навігації та картографування. Варіанти, такі як Velodyne Puck VLP-16, RIEGL miniVUX-1UAV та Livox Mid-40/100, також мають свої переваги, проте YellowScan Surveyor є найбільш збалансованим рішенням з огляду на точність, вагу і сумісність із цією моделлю дрона. Цей лідар широко

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовується для створення високоточних тривимірних моделей і інспекції інфраструктури, що особливо важливо для завдань моніторингу вітрових турбін.



Рисунок 2.6 – лідар YellowScan Surveyor

2.5.3 Обладнання для пошуку пошкоджень об'єктів вітрової енергетики

Для дрона Altura Zenith ATX8 існує кілька типів оптичних камер, які широко застосовуються в різних сферах, включно з інспекцією інфраструктури та моніторингом об'єктів вітрової енергетики.

Першим типом є високороздільні RGB-камери, які забезпечують якісне кольорове зображення з детальною передачею кольору. Вони використовуються для візуального огляду, фіксації видимих дефектів на поверхнях, таких як тріщини, корозія або забруднення. Ці камери можуть мати різну роздільну здатність, часто від 20 Мп і вище, що дозволяє отримувати чіткі фото навіть при великій висоті польоту.

Другим типом є мультиспектральні камери, які знімають у кількох спектральних діапазонах, зазвичай у видимому та близькому інфрачервоному діапазонах. Вони корисні для аналізу стану матеріалів та рослинності, оскільки дозволяють виявляти зміни, непомітні для звичайного ока, наприклад, втрату

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структурної цілісності або пошкодження, що супроводжуються зміною спектральних характеристик.

Третій тип – тепловізійні (інфрачервоні) камери, які фіксують температурні аномалії на об'єктах. Вони застосовуються для виявлення перегрівів, внутрішніх пошкоджень, тріщин, які проявляються через зміну теплового потоку. Тепловізори особливо ефективні при інспекції електрообладнання та механічних вузлів турбін. Четвертим варіантом є камери з високою частотою кадрів, які використовуються для аналізу динамічних процесів, наприклад, виявлення вібрацій або швидких змін поверхні лопатей у польоті.

Найбільш оптимальним вибором є мультиспектральна камера в інфрачервоному діапазоні. Вона дозволяє виявляти зміни в матеріалах і структурі, непомітні у видимому спектрі, що особливо важливо для своєчасного виявлення пошкоджень та деградації елементів вітрових турбін. Така камера забезпечує більш глибокий аналіз стану об'єктів, підвищуючи ефективність моніторингу і даючи змогу приймати обґрунтовані рішення щодо технічного обслуговування.

Для дрона Altura Zenith ATX8 існує кілька моделей мультиспектральних камер в інфрачервоному діапазоні, які можуть бути ефективно використані для моніторингу та інспекції об'єктів вітрової енергетики. Одним із найпопулярніших варіантів є камера MicaSense RedEdge-MX, яка має п'ять спектральних каналів, включаючи близький інфрачервоний. Ця камера відзначається високою точністю калібрування та компактним легким дизайном, що робить її сумісною з різними безпілотними платформами, у тому числі Altura Zenith ATX8. Вона широко застосовується не лише у сільському господарстві, але у задачах інспекції матеріалів, де необхідний точний спектральний аналіз.

Ще одним варіантом є камера Sentera Multispectral Double 4K, яка пропонує чотири спектральні канали поряд із RGB-датчиком, забезпечуючи високу роздільну здатність 4K для кожного спектру. Камера оснащена вбудованим GPS-модулем для геоприв'язки зібраних даних, а її легка вага і гнучка конструкція дозволяють легко інтегрувати її з різними платформами, включаючи Altura Zenith ATX8.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також варто відзначити камеру Parrot Sequoia+, яка має чотири спектральні канали, серед яких є і ближній інфрачервоний. Вбудований сонячний сенсор забезпечує корекцію освітлення, що підвищує якість отриманих даних. Її компактність і зручність монтажу роблять її популярною для застосування у сільському господарстві та інфраструктурному моніторингу(рис 2.7).



Рисунок 2.7 – мультиспектральна камера MicaSense RedEdge-MX

Враховуючи вимоги до спектрального діапазону, роздільної здатності, ваги та умов експлуатації, оптимальним вибором для інтеграції з дроном Altura Zenith ATX8 є мультиспектральна камера MicaSense RedEdge-MX. Вона поєднує у собі необхідну функціональність, надійність та сумісність, що дозволяє проводити якісний аналіз стану об'єктів вітрової енергетики.

2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі було детально розглянуто архітектуру кіберфізичної системи динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА. Особливу увагу приділено методам автоматизації траєкторії обльоту, оцінці критичності виявлених дефектів і пріоритетам технічного обслуговування. Розроблена система забезпечує точне планування польотів БПЛА з урахуванням геометричних особливостей

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструкцій та індивідуальних характеристик кожного об'єкта, що дозволяє знизити ризики пропуску дефектів та оптимізувати процес моніторингу.

Впровадження методу оцінювання критичності ушкоджень на основі елементів нечіткої логіки дозволяє здійснювати якісну класифікацію дефектів, враховуючи як технічні параметри, так і експертні оцінки. Це створює підґрунтя для ефективного прийняття рішень щодо терміновості ремонту та подальшої експлуатації обладнання. Також проаналізовано програмне та технічне забезпечення, зокрема використання бібліотеки MMDetection для автоматизованої обробки зображень, що демонструє високу ефективність при роботі з даними з БПЛА.

У результаті проведеного дослідження підтверджено, що комплексна архітектура системи, що об'єднує інтелектуальні алгоритми планування, діагностики та аналізу даних, є необхідною умовою для підвищення точності, швидкості й безпеки технічного моніторингу вітроенергетичних об'єктів. Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку предиктивного обслуговування та масштабування рішень у межах інфраструктури відновлюваної енергетики.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Опис програмного та апаратного забезпечення кіберфізично системи

Кіберфізична система для оцінювання критичності дефектів вітроенергетичних установок (ВЕУ) є багаторівневим програмно-апаратним комплексом, який поєднує засоби комп'ютерного зору, оброблення великих обсягів даних, аналіз телеметрії та інтелектуальні методи прийняття рішень. Основною функцією системи є забезпечення високоточної та оперативної діагностики конструктивних елементів ВЕУ на основі зображень, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів, оснащених RGB та інфрачервоними камерами.

Для реалізації системи було використано мікросервісну архітектуру із застосуванням контейнеризації Docker та системи оркестрації Kubernetes. Такий підхід дозволяє досягти високої гнучкості, масштабованості та ефективного управління обчислювальними ресурсами, а також спрощує супровід та оновлення окремих компонентів.

Апаратна частина системи базується на конфігурації з високою обчислювальною потужністю. Обчислення виконуються на платформі з процесором Intel Core i5-14400F, відеокартою NVIDIA RTX 4070ti з 12 ГБ відеопам'яті, 128 ГБ оперативної пам'яті DDR5 та твердотільним накопичувачем обсягом 1 ТБ (NVMe SSD). Операційна система Windows 10 забезпечує сумісність із клієнтськими додатками та підтримує необхідні драйвери для роботи із сучасним програмним забезпеченням.

Програмна реалізація системи охоплює декілька функціональних модулів, кожен з яких виконує чітко визначені завдання. Модулі комп'ютерного зору включають алгоритми глибокого навчання, зокрема YOLOv8, Cascade R-CNN та Detectron2, які реалізовано у вигляді окремих сервісів. Для попередньої обробки зображень використовується бібліотека OpenCV. Дані, що надходять від дронів, обробляються в реальному часі, а результати зберігаються в базі даних SQL. Для

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимізації продуктивності запроваджено проміжне кешування результатів обробки. Взаємодія між усіма модулями системи здійснюється за допомогою веб-сервера, реалізованого мовою програмування Rust, який відповідає за маршрутизацію запитів, зв'язок між компонентами, а також реалізацію API для взаємодії з клієнтськими застосунками.

Клієнтська частина системи включає Windows-додаток та мобільний застосунок, обидва розроблені з використанням мови програмування C#. Вони забезпечують зручний інтерфейс для взаємодії з системою, запуску процесів аналізу, перегляду результатів, керування БПЛА та отримання сповіщень у режимі реального часу. Зв'язок між клієнтськими додатками та серверною частиною реалізовано з використанням протоколу gRPC, що забезпечує високу швидкість обміну даними(рис 3.1).

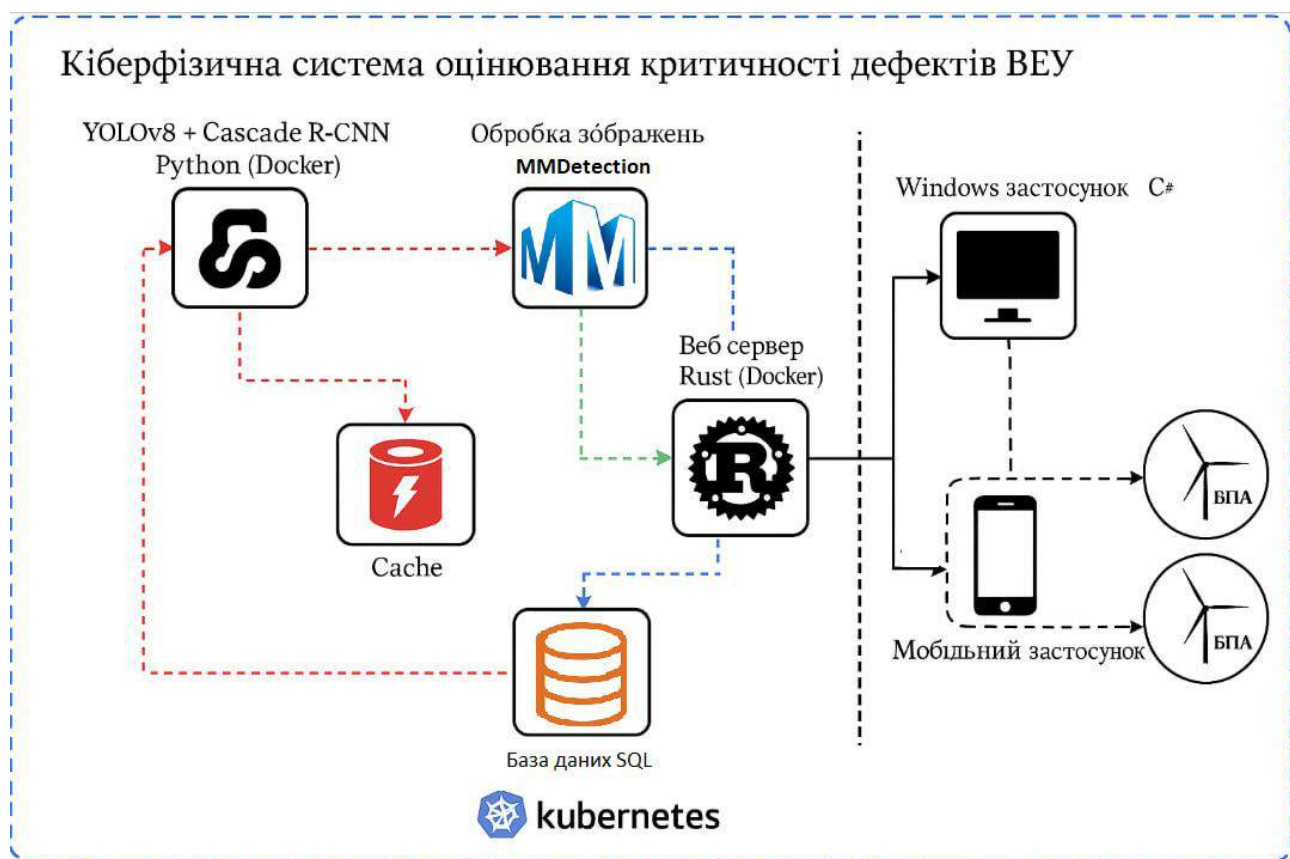


Рисунок 3.1 – Схема модулів та компонентів кіберфізичної системи

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Завдяки використанню сучасних мов програмування, технологій контейнеризації, глибинного навчання та системи оркестрації, запропонована архітектура забезпечує ефективну, надійну та масштабовану платформу для інспекції ВЕУ з можливістю розширення функціоналу відповідно до потреб користувача.

В рамках розроблення серверної частини системи було реалізовано високопродуктивний сервер мовою програмування Rust. Цей сервер виконує ключові функції: оброблення телеметричної інформації, синхронізацію потоків RGB- та ІЧ-даних, керування кешем і координацію взаємодії між усіма модулями системи. Обмін інформацією між сервером і окремими модулями реалізовано за допомогою протоколу gRPC з використанням Google Protocol Buffers (Protobuf) версії 31.0 для ефективної передачі даних у бінарному форматі. Для кешування проміжних результатів, масок дефектів і синхронізованих відеопотоків використано DashMap версії 6.0.1. Сервер також виступає посередником між консольною клієнтською частиною, модулями оброблення зображень та нейронними мережами, що функціонують у середовищі контейнеризації Docker версії 2.28.0.

Модуль оброблення зображень, реалізований на C++ із використанням бібліотеки MMDetection, виконує попередню обробку вхідних RGB- та ІЧ-зображень. Зокрема, здійснюється фільтрація шумів, нормалізація контрасту, виявлення контурів потенційних пошкоджень і побудова теплових карт. Цей модуль працює як окремий Docker-контейнер і взаємодіє з сервером через gRPC. Результати оброблення передаються у вигляді бінарних повідомлень для подальшого аналізу або зберігаються в кеші.

Окремі модулі нейронних мереж, написані мовою Python, відповідають за виявлення, сегментацію та аналіз дефектів. Для реєстрації тріщин і температурних аномалій у реальному часі використовується модель YOLOv8, а для уточнення меж і геометричних параметрів пошкоджень - Cascade R-CNN. На початкових етапах оброблення зображень застосовується Detectron2 версії 0.6, що дозволяє

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ідентифікувати компоненти вітрових турбін. Усі згадані модулі розгорнуто в Docker-контейнерах із підтримкою GPU-прискорення, що забезпечує високу швидкість оброблення великих обсягів даних. Сервер отримує результати роботи нейронних мереж через gRPC і передає їх для зберігання або подальшої обробки.

Для збереження всіх типів даних, включно з телеметрією польотів, RGB- і ПЧ-зображеннями, результатами аналізу дефектів (координати, розміри, температурні показники) та метаданими щодо компонентів вітроустановок, використовується реляційна база даних SQL. База також містить історію виявлених пошкоджень і оцінки їхньої критичності, розраховані на основі аналізу.

Мережева інфраструктура системи розгорнута в локальному середовищі. Пропускна здатність мережі становила 100 Mbit/s, що дозволяло здійснювати оброблення даних у реальному часі. Всі з'єднання між сервером, модулями оброблення зображень та нейронними мережами реалізовані у вигляді прямих каналів. Для підвищення безпеки та ефективності обміну інформацією були налаштовані виділені підмережі та застосовано політики QoS для пріоритизації критичного трафіку. Вся передача даних між модулями здійснювалася через зашифровані TLS-канали з використанням gRPC.

Керування розподіленими контейнерами здійснювалося системою оркестрації Kubernetes версії 1.31.3. Компоненти системи -сервер, модулі оброблення та нейронні мережі - були представлені у вигляді окремих подів. Kubernetes забезпечував автоматичне масштабування кількості контейнерів відповідно до навантаження, автоматичний перезапуск у разі збоїв, а також ізоляцію трафіку між подами за допомогою мережевих політик. Стан системи та споживання ресурсів відстежувалося засобами моніторингу Prometheus, а для візуалізації показників використовувалася платформа Grafana.

3.1.1 Метод мультиспектральних зображень ВЕУ

У процесі інспекції вітроенергетичних установок за допомогою безпілотних літальних апаратів виконується паралельна фіксація зображень у видимому (RGB)

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та інфрачервоному (IR) спектрах. Це дозволяє поєднувати структурну інформацію про зовнішній стан поверхні з даними про теплові характеристики, що є надзвичайно цінним для виявлення дефектів, які не завжди мають візуальне відображення.

RGB-зображення забезпечують високу деталізацію об'єкта, дозволяючи фіксувати тріщини, відколи, відшарування покриття та інші візуально спостережувані пошкодження. Водночас інфрачервоні зображення дозволяють визначити температурні аномалії, які можуть свідчити про наявність прихованих дефектів, наприклад, порушень теплоізоляції, внутрішніх тріщин або зон підвищеного тертя. Таким чином, кожен тип зображення має свої сильні сторони, однак поєднання обох джерел інформації дозволяє створити більш повну та достовірну картину технічного стану об'єкта(рис 3.2).

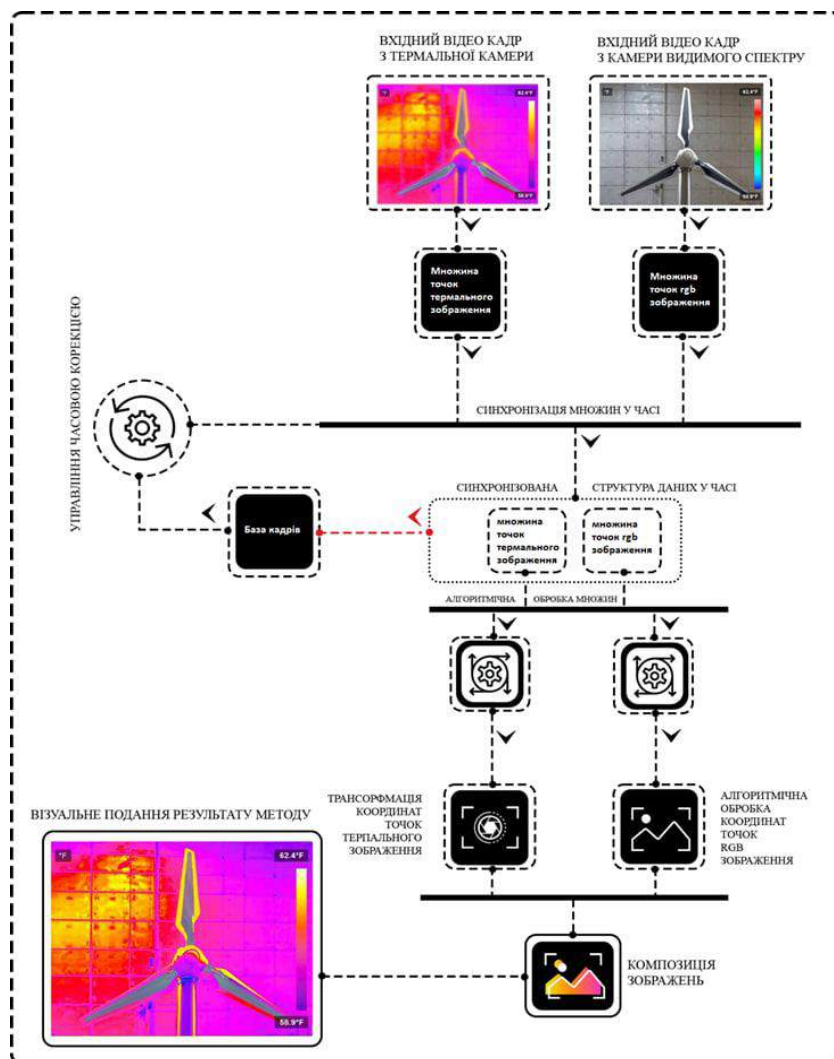


Рисунок – 3.2 Схема візуалізації структур даних

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Суть методу злиття полягає в тому, щоб синхронізувати та об'єднати зображення з різних спектральних діапазонів у єдину інформаційно насичену структуру. Це здійснюється шляхом просторового вирівнювання кадрів, врахування параметрів камер, кутів зйомки, масштабу зображень і можливих спотворень. У результаті формується мультиспектральне зображення, яке суміщає високодеталізовану текстурну інформацію RGB-формату з температурними даними з інфрачервоного каналу.

Об'єднане зображення дозволяє значно точніше визначити локалізацію дефекту, оцінити його характер і, за потреби, прийняти оперативне рішення про подальші дії. Завдяки такому підходу зменшується час на аналіз знімків, оскільки оператору або системі автоматичного розпізнавання не потрібно переглядати зображення окремо. Усе необхідне зосереджено в одному, єдиному візуальному представленні.

Крім того, метод злиття мультиспектральних зображень суттєво підвищує надійність та точність роботи алгоритмів глибокого навчання, які використовуються для виявлення дефектів. Завдяки наявності додаткового каналу інформації система може краще відрізнити справжні пошкодження від тіней, бруду або інших незначних артефактів, які на RGB-зображеннях можуть виглядати як потенційна загроза.

Однак, варто зауважити, що ефективність методу безпосередньо залежить від якості калібрування камер, стабільності зйомки та погодних умов. Навіть незначні коливання дрону або зміни освітлення можуть вплинути на точність накладання зображень. Крім того, на інфрачервоні сенсори можуть негативно впливати туман, дощ або пил, що ускладнює збір теплової інформації. Незважаючи на ці виклики, сучасні алгоритми обробки зображень і методи машинного навчання дозволяють компенсувати частину похибок і підвищити загальну стійкість системи до зовнішніх чинників.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом, використання методу злиття мультиспектральних зображень у контексті інспекції вітрових турбін відкриває нові можливості для технічного моніторингу. Це не лише забезпечує ширший спектр даних для аналізу, але й значно покращує здатність системи до раннього виявлення дефектів. Такий підхід створює основу для побудови інтелектуальних систем діагностики, які працюють автономно, швидко реагують на зміни технічного стану об'єкта та знижують ризик аварійного простою енергетичного обладнання.

3.2 Реалізація системи динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів.

3.2.1 Аналіз результатів експериментальних досліджень та порівняння з традиційними методами

Після завершення розробки прототипу кіберфізичної системи динамічного збору візуальних даних було проведено серію експериментальних досліджень, спрямованих на перевірку її ефективності в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації вітрових енергетичних установок. Метою цих випробувань було не тільки підтвердження працездатності технічних і програмних компонентів, але й порівняння з традиційними підходами, які наразі використовуються для технічного обстеження турбін.

Експериментальні випробування системи були проведені в умовах, які моделювали як лабораторне середовище, так і реальні експлуатаційні сценарії функціонування вітроенергетичних установок. У процесі тестування було змодельовано різні ситуації, що відображають типові умови роботи турбін у промислових вітропарках.

Перший етап експериментів було організовано в контрольованих умовах з попереднім припиненням роботи вітроустановки. Це дозволило виключити вплив змінних факторів середовища та забезпечити повторюваність результатів. Для коректності оцінювання було витримано інтервал між зупинкою турбіни та

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виявляють тріщини чи зони перегріву, і не дозволяють проводити порівняння динаміки змін пошкоджень у часі.

Натомість, запропонована система має низку незаперечних переваг. Насамперед, вона забезпечує повне покриття поверхні вітрової турбіни за один автономний політ без необхідності втручання оператора, що значно підвищує оперативність обстеження. Це дає змогу не лише заощаджувати час, а й отримувати максимально повну і детальну інформацію про технічний стан об'єкта. Завдяки застосуванню камер, що функціонують у двох спектральних діапазонах – видимому (RGB) та інфрачервоному (тепловому), – система дозволяє виявляти не лише зовнішні, а й приховані дефекти, які зазвичай залишаються поза увагою під час візуального чи фотозйомного огляду. Такий підхід підвищує точність оцінки стану об'єкта та розширює діапазон виявлюваних пошкоджень.

Надійність і достовірність аналізу забезпечуються за рахунок об'єктивності та повторюваності результатів: усі зібрані дані автоматично зберігаються у цифровому вигляді, архівуються й можуть бути використані для подальших порівняльних досліджень або повторного аналізу при виявленні нових змін. Завдяки високій швидкості обробки інформації система здатна ідентифікувати нові ушкодження вже протягом 24 годин з моменту їх фактичної появи.

Крім того, автоматизація процесів значно знижує навантаження на обслуговуючий персонал. Людський фактор практично усунуто – від оператора вимагається лише попереднє налаштування параметрів польоту та запуск місії.

Під час польових випробувань система виявила низку локальних зон перегріву поблизу моторного відсіку, які залишилися непоміченими під час попереднього ручного огляду. Ці термальні аномалії свідчили про порушення теплоізоляції, спричинені поступовою деградацією матеріалу. Завдяки своєчасному виявленню таких дефектів було запобігано потенційній зупинці турбіни, яка, за попередніми оцінками, могла тривати декілька діб та спричинити суттєві економічні втрати (рис. 3.3).

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.3 – Результати порівняння виявлення дефектів на RGB-зображенні

У порівнянні з попередніми дослідженнями, присвяченими інспектуванню вітроенергетичних установок із використанням БПЛА, запропонований підхід демонструє вищу точність виявлення дефектів і покращену інтерпретованість результатів.

Попередні рішення, побудовані на базі одного сенсора або окремих моделей машинного навчання (наприклад, лише YOLO чи класифікатори на основі SVM), у складних умовах освітлення зазвичай досягали граничної точності близько 80%. Натомість запропонована ансамблева система, яка поєднує тепловізійні та RGB-дані, демонструє стабільно високі результати понад 90% точності для всіх типів дефектів. Такий результат узгоджується з попередніми дослідженнями, що підтверджують ефективність мультисенсорного підходу та глибокого навчання для підвищення якості виявлення дефектів. Однією з ключових переваг запропонованого програмного конвеєра є його інтерпретованість, досягнута завдяки використанню підсистеми нечіткої логіки. У той час як окремі попередні роботи застосовували жорсткі порогові значення для класифікації серйозності дефектів, такий підхід не дозволяє адаптуватися до контекстно-залежних змін характеристик компонентів вітротурбін. Нечіткий підхід натомість базується на

функціях належності, які дозволяють об'єднувати як геометричні, так і температурні дані, формуючи безперервні числові оцінки ризику, що покращує класифікацію аномалій. Завдяки адаптивності така система здатна виявляти й незначні зміни, які були б проігноровані у разі використання фіксованих порогів.

Разом з тим, запропоноване рішення має і певні недоліки. Основним обмеженням є підвищене обчислювальне навантаження. Ансамблеве виявлення, особливо коли одночасно використовуються моделі YOLOv8, Cascade R-CNN та інші згорткові нейронні мережі, що генерують множинні рамки для подальшого об'єднання, вимагає потужнішого апаратного забезпечення порівняно з однією моделлю. Це може бути критично для легких БПЛА з обмеженими обчислювальними ресурсами. Додатковим обмеженням є залежність нечіткої підсистеми від експертних ваг. У разі обмеженості або суперечливості наявних експертних знань може виникати ризик неправильної калібровки функцій належності, що своєю чергою призводить до неточних або нестабільних оцінок серйозності дефектів, особливо для нових або рідкісних типів пошкоджень, які не були враховані під час первинного моделювання.

Загалом отримані результати вказують на значний потенціал запропонованого методу для практичного застосування в системах управління активами вітроенергетики. Водночас залишаються відкритими деякі виклики, які потребують подальших досліджень.

Серед них слід виділити необхідність постійної калібровки сенсорів з метою запобігання зміщенню вимірювань температури або геометричних характеристик. Окрему групу перспективних досліджень становлять питання реального часу та обчислень на борту, коли БПЛА виконують оброблення даних автономно, передаючи на наземні станції лише підсумкові результати. Подолання обмежень, пов'язаних з недостатньою потужністю GPU на малогабаритних БПЛА, залишається як технічною, так і алгоритмічною проблемою.

3.2.2 Аналіз точності виявлення дефектів на злитих зображеннях та RGB

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У межах експериментального дослідження було проведено всебічну оцінку точності виявлення дефектів на компонентах вітроенергетичних установок із використанням сучасних моделей глибокого навчання. Основну увагу було зосереджено на порівнянні двох підходів до обробки зображень -аналізу стандартних RGB-зображень та використання злитих мультиспектральних зображень, що поєднують видимий і тепловий діапазони. Такий підхід дозволив оцінити, наскільки ефективним є метод злиття даних у підвищенні достовірності автоматичного виявлення пошкоджень(рис 3.4).



Рисунок 3.4 – Результати порівняння на дефекти лопатей з гостровидним кутом

Для виявлення дефектів застосовувалась модель YOLOv8, яка є сучасним прикладом детектора об'єктів, оптимізованого для швидкої та точної роботи з візуальними даними. Крім цього, було сформовано ансамбль нейромережевих моделей, які поєднували різні архітектури та підходи до обробки вхідних даних, зокрема включення температурної інформації. Завдяки цьому стало можливим досягти більшої стійкості до шумів, освітлення та інших факторів, що ускладнюють точну інтерпретацію зображень.

У ході дослідження було встановлено, що дефекти на компонентах турбін, зокрема на лопатях, башті та елементах кріплення, краще ідентифікуються на злитих зображеннях. Особливо це стосується таких типів ушкоджень, як

мікротріщини, ознаки корозії, локальні перегріву, які можуть бути частково або повністю невидимими на звичайних кольорових знімках. Теплова інформація, інтегрована у зображення, дозволяла системі краще розрізняти потенційно небезпечні зони навіть за умов нерівномірного освітлення чи тіней, що зазвичай знижують ефективність RGB-аналізу(рис 3.5).



Рисунок 3.5 – Результати порівняння на дефекти башти

Аналіз точності виявлення дефектів було здійснено за ключовими метриками, серед яких Precision, Recall, F1-score та ROC-AUC. Усі ці показники свідчили про перевагу використання мультиспектральних злитих зображень. Наприклад, точність (Precision) і повнота (Recall) істотно зросли, що свідчить про зменшення як хибнопозитивних, так і хибнонегативних результатів. Це особливо важливо при роботі з критичними дефектами, такими як тріщини чи перегріву, адже їх пропуск або помилкове виявлення можуть спричинити як аварійну зупинку турбіни, так і зайві витрати на технічне обслуговування.

Показник F1-score, який є збалансованим узагальненням точності й повноти, зріс до 89,5%, що свідчить про високу узгодженість між виявленими дефектами та фактичним станом об'єктів. Паралельно з цим спостерігалось підвищення метрики ROC-AUC до 94,3%, що підтверджує здатність моделі чітко відокремлювати дефектні зони від справних навіть у складних візуальних умовах. Це стало

можливим завдяки поєднанню спектральної інформації з аналітичними можливостями нейронних мереж.

Поглиблений аналіз різних компонентів ВЕУ показав, що найбільшу користь від мультиспектрального підходу отримали зони з нерівномірним освітленням, складною геометрією або змінною відстанню до об'єктива. До таких компонентів належать лопаті турбіни, особливо при обльотах під гострим або горизонтальним кутом, де спостерігаються значні спотворення та відблиски. Інфрачервоний канал, інтегрований у загальну картину, дозволяє компенсувати втрату точності, викликану цими факторами (рис 3.6).

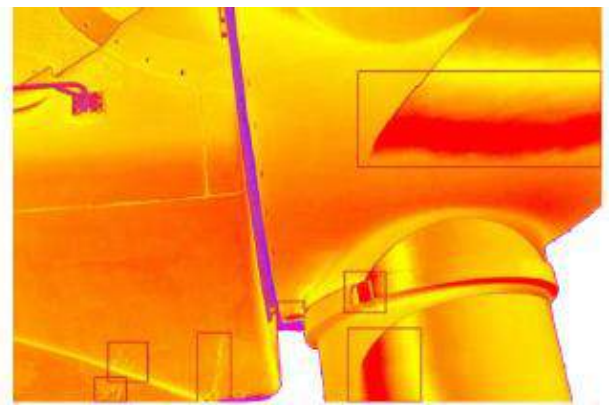


Рисунок 3.6 – Результати порівняння на дефекти мотора ВЕУ

Таким чином, результати експериментального дослідження чітко вказують на те, що поєднання злитих зображень і ансамблевого аналізу моделей нейромережевого типу є дієвим способом покращення якості виявлення дефектів на об'єктах вітроенергетики. Такий підхід забезпечує не лише зростання точності, але й підвищення загальної надійності системи технічного моніторингу. Отримані висновки можуть бути використані як основа для подальшого вдосконалення системи, а також для розробки нових рішень, спрямованих на підвищення безпеки експлуатації, зниження ризиків та оптимізацію витрат на обслуговування.

Одним із ключових завдань кіберфізичної системи є не лише виявлення дефектів, а й визначення ступеня їх критичності, що безпосередньо впливає на прийняття рішень щодо терміновості ремонту або технічного обслуговування

вітроенергетичної установки. У цьому підпункті розглядається експериментальне підтвердження ефективності методу оцінювання критичності, який було реалізовано в межах розробленої системи.

Під час дослідження було змодельовано низку інспекційних сценаріїв, у яких система автоматично ідентифікувала різні типи пошкоджень - зокрема тріщини, ділянки корозії, а також теплові аномалії, що могли свідчити про внутрішній перегрів. Для кожного такого дефекту було зафіксовано набір фізичних параметрів, зокрема довжину або площу ушкодження, локальне підвищення температури, геометричну форму тощо. Ці параметри автоматично розраховувалися на основі обробки злитих зображень, що поєднували видимий спектр і теплову інформацію.

Наступним етапом стала формалізація експертного підходу до оцінювання серйозності виявлених пошкоджень. На основі консультацій із фахівцями в галузі технічного обслуговування турбін були визначені орієнтовні коефіцієнти вагомості для кожного типу дефекту, а також функції належності, які описують ступінь небезпеки залежно від конкретних значень параметрів. Для цього було побудовано базу нечітких правил, що враховували комбінації ознак (наприклад, довга тріщина + зона перегріву = висока критичність). Ці правила реалізувалися у вигляді системи нечіткої логіки, яка дозволяла адаптивно формувати інтегровану оцінку.

У процесі оцінювання кожен виявлений дефект аналізувався на основі поєднання фізичних параметрів і експертних суджень, після чого система формувала числовий показник критичності - значення, що відображало реальний ризик для експлуатації обладнання. Цей показник використовувався для класифікації дефектів за трьома рівнями: низька критичність (планове спостереження), середня критичність (рекомендоване втручання) та висока критичність (терміновий ремонт). У межах експерименту було оброблено 10 прикладів дефектів, які відрізнялися типом, розміром, локалізацією та спектральними характеристиками. Для кожного з них система надала власну оцінку, яка була зіставлена з експертною думкою спеціалістів. У переважній більшості випадків значення, згенеровані системою, демонстрували високу

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кінець таблиці 3.2

Корозія	Лопать	0.5	-	3.5	5.0
Корозія	Башта	1.2	-	5.0	4.2
тріщина	облицювання	0.4	-	2.5	2.4

Аналіз таблиці 3.1 дозволяє зробити низку важливих висновків щодо ефективності автоматизованої системи оцінювання критичності дефектів. Усі 10 прикладів дефектів, змодельованих у ході експериментального дослідження, охоплюють основні типи пошкоджень, характерних для різних компонентів вітроустановки - лопатей, башти, електронних та механічних вузлів. У кожному випадку система на основі спектральної інформації та заданих правил формувала оціночний показник критичності, який потім порівнювався з незалежною експертною оцінкою. Як видно з результатів, значення, згенеровані автоматизованою системою, у більшості випадків дуже близькі до оцінок, наданих експертами. Наприклад, у випадках перегріву мотору та генератора (де фіксувалося підвищення температури на 15°C і 20°C відповідно), система точно класифікувала ситуацію як критичну, з максимально можливими оцінками (4,9 і 5,0), які практично повністю збігаються з оцінками експертів.

У випадках корозії на башті або лопаті, де площа пошкодження становила від 0,5 до 1,2 м², автоматизована оцінка дещо нижча за експертну, однак відхилення не перевищує 0,3–0,4 бала, що перебуває в допустимих межах. Це свідчить про те, що система, хоча й схильна до обережності, все ж точно розпізнає ступінь небезпеки та не переоцінює ризики.

Особливо показовими є результати щодо тріщин. Наприклад, тріщина довжиною 1,2 метра на лопаті отримала оцінку 4,3 автоматично, що практично збігається з експертною – 4,5. Навіть для менш виражених тріщин (наприклад, довжиною 0,4 метра на облицюванні) система надала адекватну низьку оцінку - 2,4, що також підтверджується незалежним аналізом.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом, середнє абсолютне відхилення між автоматизованими та експертними оцінками по всій вибірці становило приблизно 0,2-0,3 бала, що є доволі точним результатом з огляду на складність і варіативність дефектів. Такі показники свідчать про високу відповідність алгоритму до експертних критеріїв, а також про надійність системи як діагностичного інструменту для реального використання в польових умовах.

Крім точності, метод демонструє ще одну важливу властивість - послідовність. В усіх випадках зі схожими характеристиками система показує однаково узгоджені результати, що особливо важливо для промислових рішень, де критичною є передбачуваність дій алгоритму. Це дозволяє формалізувати процес ухвалення технічних рішень, зменшити вплив людського чинника, а також - у перспективі - інтегрувати автоматизовану оцінку критичності у системи технічного планування й обліку.

Таким чином, проведений експеримент із використанням 10 умовних сценаріїв підтвердив ефективність і практичну придатність розробленого методу для оцінювання ступеня небезпеки виявлених дефектів. У поєднанні з високоточними системами виявлення, що базуються на мультиспектральному аналізі, цей підхід формує комплексне рішення для забезпечення безперервного, інтелектуального моніторингу об'єктів вітроенергетики.

3.2.3 Аналіз обмежень розробленої кіберфізичної системи

З огляду на мету дослідження, яка полягає в підвищенні ефективності збору, точності розпізнавання та оброблення зображень, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів для виявлення дефектів на об'єктах вітрової енергетики, доцільно проаналізувати обмеження та граничні умови, що можуть впливати на точність функціонування кіберфізичної системи за обраною архітектурою. Одним із ключових обмежень є технічні та фізичні характеристики безпілотника і сенсорного обладнання, зокрема просторове розділення

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тепловізійних камер, яке не завжди дозволяє виявляти дрібні або початкові ушкодження. Окрім цього, нестабільність польотної траєкторії в умовах сильного вітру або через похибки позиціонування може знижувати точність просторової прив'язки та ускладнювати побудову агрегованої моделі дефекту, що необхідна для формування оцінки його критичності.

Ще одним фактором, що впливає на надійність вхідних даних, є погодні умови. Несприятливі атмосферні фактори, такі як дощ, туман, сильні пориви вітру або недостатнє освітлення, можуть зумовити зниження якості отриманих RGB та ГЧ зображень. Це, у свою чергу, негативно позначається на точності подальшого аналізу, зокрема на процесах виявлення контурів і визначення температурних аномалій. Крім того, значний вплив на результати аналізу має точність налаштування параметрів нечітких множин та експертних правил, які формують основу моделі оцінювання критичності. Наявність похибок у формалізації експертних знань або недостатня кількість репрезентативних прикладів для навчання може призводити до зниження достовірності системи при ухваленні рішень щодо технічного обслуговування чи ремонту. Таким чином, забезпечення стабільності роботи кіберфізичної системи у реальних умовах експлуатації вітроустановок потребує постійного моніторингу, верифікації та адаптації як технічних параметрів, так і логіки роботи експертної моделі. Це дозволяє зменшити вплив зовнішніх чинників та забезпечити більш високу точність оцінювання технічного стану елементів ВЕУ.

Для оцінки потенціалу запропонованої системи виявлення дефектів було змодельовано умовний сценарій, що відображає типову ситуацію, з якою може зіткнутися оператор вітроенергетичної установки під час планового обстеження обладнання. У межах цього сценарію система здійснює автоматичний обліт вітрової турбіни, збираючи мультиспектральні зображення об'єкта з використанням одночасно видимого та інфрачервоного спектрів.

У ході моделювання умовного інспекційного об'єкту система фіксує теплову аномалію в ділянці з'єднання роторного вузла з основною частиною турбіни.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відхилення виявляється винятково в інфрачервоному діапазоні -RGB-зображення не демонструють жодних візуально помітних змін або пошкоджень. Поверхня виглядає однорідною, без тріщин, змін кольору або деформацій. Водночас аналіз теплового каналу виявляє стійке перевищення температури в окремій зоні приблизно на 10–12°C у порівнянні з сусідніми ділянками. За результатами обробки зображення система визначає локальний перегрів і класифікує його як потенційно небезпечний для подальшої експлуатації.

Особливістю цього сценарію є той факт, що дефект неможливо виявити за допомогою звичайних візуальних методів. Навіть досвідчений оператор, оглядаючи турбіну з поверхні або за допомогою звичайної камери, не побачить жодних ознак несправності. Тим часом, інфрачервона зйомка дає змогу виявити приховану термічну нестабільність, яка може свідчити про пошкодження термоізоляційного шару, погіршення кріплення або внутрішні механічні деформації, не видимі зовні. У цьому змодельованому випадку система не тільки виявляє аномалію, але й формує технічний звіт, що включає координати виявленої зони, площу дефектної області, температуру поверхні та її відхилення від норми. З урахуванням цих даних, оператор отримує рекомендацію щодо проведення локального обстеження відповідного вузла турбіни або профілактичної заміни підозрілого елемента. Таким чином, система виконує не лише діагностичну, а й аналітичну функцію, забезпечуючи технічний персонал не просто сигналом про дефект, а структурованою інформацією для ухвалення рішень.

Теоретичне значення даного варіанту полягає в демонстрації важливої переваги системи – її здатності виявляти початкові прояви проблем, які традиційними методами залишаються невидимими до моменту, коли наслідки стають незворотними. Завдяки цьому підхід до технічного обслуговування трансформується із реактивного в проактивний. В умовах промислової експлуатації така можливість значно знижує ризики аварійних зупинок і сприяє підвищенню загальної надійності електрогенерувального обладнання.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Умовна оцінка можливих економічних втрат у разі ігнорування подібного дефекту підтверджує доцільність використання запропонованої системи. Якщо перегрів буде прогресувати, а пошкодження залишаться не виявленими, це може призвести до аварійної зупинки турбіни, що тягне за собою не лише фінансові втрати через простій, але й витрати на ремонт, логістику, повторну інспекцію та втрату виробленої електроенергії.

Таблиця 4.2 – Оцінка ефективності системи на основі моделювання

Параметр	Значення
Тип змодельованого дефекту	Локальний перегрів у механічному вузлі
Видимість у RGB	Відсутня
Видимість в ІЧ-діапазоні	Яскраво виражена теплова пляма
Класифікація загрози	Середньо-критична (термін реакції -48 год)
Згенерований результат	Автоматичний звіт + рекомендація реагування
Потенційні втрати без втручання	2000–3000 євро (відповідно до умовного розрахунку)

3.3 Висновки до третього розділу

У третьому розділі дипломної роботи здійснено програмно-апаратну реалізацію кіберфізичної системи динамічного збору візуальних даних для виявлення дефектів об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА. Основна увага була зосереджена на інтеграції сучасних сенсорних технологій, методів комп'ютерного зору та алгоритмів глибокого навчання у єдину функціональну платформу, здатну до автономної роботи в умовах складного рельєфу та погодних змін. Система включає апаратну частину на основі безпілотного літального апарата

з мультиспектральними камерами (RGB і тепловізійними), програмну платформу для обробки даних, зокрема за допомогою бібліотеки MMDetection, а також механізм автоматичного аналізу зображень із застосуванням згорткових нейронних мереж. У результаті впровадження багатоканального збору даних стало можливим не лише виявлення поверхневих пошкоджень конструкцій, а й ідентифікація температурних аномалій, які можуть свідчити про внутрішню деградацію матеріалів.

В межах розділу було також реалізовано алгоритм оцінки критичності виявлених дефектів із застосуванням нечіткої логіки. Цей підхід дозволив інтегрувати об'єктивні параметри (розмір, локалізація, форма пошкодження) та експертні оцінки в єдину шкалу ризику. Таким чином, система не лише фіксує наявність дефекту, а й формує обґрунтовані рекомендації щодо необхідності і терміновості технічного втручання.

Експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність запропонованого рішення. Зокрема, точність виявлення дефектів перевищила 90% за ключовими метриками (Precision, Recall, F1-score), а час, необхідний на повноцінну інспекцію однієї вітрової турбіни, було скорочено майже вдвічі у порівнянні з традиційними методами ручної перевірки. Це свідчить про суттєве підвищення ефективності, безпеки та оперативності проведення технічного моніторингу.

Разом із тим, були виявлені і певні обмеження: висока вартість реалізації системи, потреба у спеціалізованому навчанні персоналу, обмеження, пов'язані з погодними умовами та обсягами даних, що потребують зберігання й обробки. Утім, у довгостроковій перспективі ці недоліки компенсуються економічною доцільністю впровадження системи завдяки зниженню витрат на обслуговування, зменшенню аварійності та продовженню експлуатаційного ресурсу обладнання.

Таким чином, запропонована кіберфізична система може бути ефективно інтегрована у загальну інфраструктуру обслуговування об'єктів відновлюваної енергетики, сприяючи підвищенню надійності роботи вітроелектростанцій,

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оперативності реагування на потенційні ризики та цифровізації процесів технічного управління.

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Gao Z., Liu X. An overview on fault diagnosis, prognosis and resilient control for wind turbine systems . *Processes*. 2021. Vol. 9, No. 2. Article No. 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9020300>
2. Du Y., Zhou S., Jing X., Peng Y., Wu H., Kwok N. Damage detection techniques for wind turbine blades: A review . *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 141. P. 106445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106445>.
3. Svystun S., Melnychenko O., Radiuk P., Savenko O., Sachenko A., Lysyi A. Dynamic trajectory adaptation for efficient UAV inspections of wind energy units. org. 2024. Vol. 12, No. 3. Article No 3. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.17534>.
4. Svystun S., Melnychenko O., Radiuk P., Savenko O., Sachenko A., Lysyi A. Thermal and RGB images work better together in wind turbine damage detection . *International Journal of Computing*. 2024. Vol. 23. P. 526–535. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.23.4.3752>.
5. Melnychenko O., Savenko O., Radiuk P. Apple detection with occlusions using modified YOLOv5-v1 . *Proceedings of the 2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Dortmund, Germany, 7–9 September 2023. Vol 13 P. 107–112. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348779>.
6. Tan M., Pang R., Le Q. V. EfficientDet: Scalable and efficient object detection. *Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle, WA, USA, 13–19 June 2020. New York, 2020. P. 10781–10790. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.01079>.
7. Svystun S., Scislo L., Pawlik M., Melnychenko O., Radiuk P., Savenko O., Sachenko A. DyTAM: Accelerating Wind Turbine Inspections with Dynamic UAV Trajectory Adaptation . *Energies*. 2025. Vol. 18, No 7. Art no 1823. P. 215-228. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18071823>.
8. Memari M., Shakya P., Shekaramiz M., Seibi A. C., Masoum M. A. S. Review on the advancements in wind turbine blade inspection: Integrating drone and deep

					КВРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

learning technologies for enhanced defect detection. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 33236–33282. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3371493>

9. Thomas D., Gündel M., Wickers A., Alpen M., Horn J. Multivariate inspection of German steel civil infrastructure using autonomous UAS. *In: Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*. London: CRC Press, 2023. P. 493–500. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003323020-58>.

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

11. Zhang Q., Xiao T., Huang N., Zhang D., Han J. Revisiting feature fusion for RGB-T salient object detection. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2021. Vol. 31, No. 5. P. 1804–1818. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2020.3014663>

12. Свистун С. О., Мельниченко О. В., Скрипник Т. К. Проектування робочої місії безпілотних літальних апаратів в тривимірному просторі . *Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2023* : зб. наук. пр. XV Всеукр. наук.-практ. конф. (Хмельницький, 17–18 листопада 2023 р.). Хмельницький, 2023. С. 269–274.

13. Melnychenko O., Scislo L., Savenko O., Sachenko A., Radiuk P. Intelligent integrated system for fruit detection using multi-UAV imaging and deep learning. *Sensors*. 2024. Vol. 24. Art No. 1913. P.7-12 DOI: <https://doi.org/10.3390/s24061913>

14. Shamsavarani S., López F., Ibarra-Castanedo C., Maldague X. Semantic segmentation of defects in infrastructures through multi-modal images . *Thermosense: Thermal Infrared Applications XLVI*. Bellingham, WA, USA: *SPIE Digital Library*, 2024. P. 199–208. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3013884>

15. Memari M., Shekaramiz M., Masoum M. A. S., Seibi A. C. Data fusion and ensemble learning for advanced anomaly detection using multi-spectral RGB and thermal

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

imaging of small wind turbine blades. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 3. Article No. 673.

DOI: <https://doi.org/10.3390/en17030673>

16. Skydio X10 – FAQ URL: <https://www.skydio.com/x10> (дата звернення 13.05.2025)

17. DJI. Mavic 3 Enterprise – Технічні характеристики URL: <https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs> (дата звернення 13.05.2025)

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

19. Kong K., Dyer K., Payne C., Hamerton I., Weaver P. M. Progress and trends in damage detection methods, maintenance, and data-driven monitoring of wind turbine blades – A review. *Renewable Energy Focus*. 2022. Vol. 44. P. 390–412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.08.005>

20. Pérez D., Alcántara A., Capitán J. Distributed trajectory planning for a formation of aerial vehicles inspecting wind turbines . *Proceedings of the 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Dubrovnik, Croatia, 21–24 June 2022. New York, NY, USA: IEEE, 2022. Vol. 32. P. 646–654. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICUAS54217.2022.9836173>

21. Свистун С. О. Розподілена архітектура системи управління та навігації БПЛА . *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. 2024. Т. 345, № 6(2). С. 114–124. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-345-6-18>

22. Mayfield C. Automating the classification of thematic rasters for weighted overlay analysis in GeoPlanner for ArcGIS. Master of Science Thesis. University of Redlands, Redlands, CA, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26716/redlands/master/2020.6>

					КВРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Repair of wind turbine blades: Review of methods and related computational mechanics problems URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119304252?via%3Dihub> (дата звернення 13.05.2025)

24. Memari M., Shekaramiz M., Masoum M. A. S., Seibi A. C. Data fusion and ensemble learning for advanced anomaly detection using multi-spectral RGB and thermal imaging of small wind turbine blades. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 3. Article No. 673. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17030673>

25. Mishnaevsky L., et al. Repair of wind turbine blades: Costs and quality . Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2265, No. 3. Article No. 032032. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032032>

26. Sun T. Machine learning-based fault diagnosis methods and their applications for wind turbines: a review . IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 147481–147511. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3124025>

27. Moll J., Arnold P., Mälzer M., Krozer V., Pozdniakov D., Salman R., et al. Radar-based structural health monitoring of wind turbine blades: The case of damage detection . *Structural Health Monitoring*. 2021. Vol. 17, No. 4. P. 815–822. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921717721447>

28. Gaeta A., Loia V., Orciuoli F. A comprehensive model and computational methods to improve situation awareness in intelligence scenarios . *Applied Intelligence*. 2021. Vol. 51, No. 9. P. 6585–6608. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10489-021-02673-z>

29. Meng L., et al. A robust registration method for UAV thermal infrared and visible images taken by dual-cameras. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2022. Vol. 192. P. 189–214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.08.018>

30. Cheng J., et al. Deep reinforcement learning for cost-optimal condition-based maintenance policy of offshore wind turbine components. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 283. Article No. 115062. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115062>

					КВРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

31. Reddy S. S. P., et al. Use of composite materials and hybrid composites in wind turbine blades . *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. P. 2827–2830. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.745>

32. Tavares A., et al. Machine learning approaches to damage detection in composite structures combining experimental and simulation domains . *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024. Vol. 215. Article No. 111412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111412>

33. Davidzon M. I. Newton’s law of cooling and its interpretation . *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 55, No. 20–21. P. 5395–5403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.03.035>

34. Arbella-Feliciano Y., et al. Condition monitoring of wind turbines: A case study of the Gibara II wind farm . *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2023. Vol. 56, No. 2. P. 329–335. DOI: <https://doi.org/10.18280/jesa.560218>

35. Mishnaevsky L., et al. Materials of large wind turbine blades: recent results in testing and modeling . *Wind Energy*. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 84–96. DOI: <https://doi.org/10.1002/we.470>

36. Wind turbine SG 3.4-132. Siemens Gamesa Renewable Energy URL: <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/products-and-services/onshore/windturbine-sg-3-4-132.html>

37. Brenner M., Reyes N. H., Susnjak T., Barczak A. L. C. RGB-D and thermal sensor fusion: A systematic literature review . *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 82410–82442. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3301119>

38. Bianchi F. D., Mantz R. J., Battista H. Modelling of variable-speed variablepitch wind energy conversion systems. *Wind Turbine Control Systems*. London, 2021. Vol. 2. P. 28–49. URL: https://doi.org/10.1007/1-84628-493-7_3

39. Progress and trends in damage detection methods, maintenance, and datadriven monitoring of wind turbine blades –K. Kong et al. *Renewable Energy Focus*. 2022. Vol. 44. P. 390–412. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.08.005>

					КВРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк. 72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

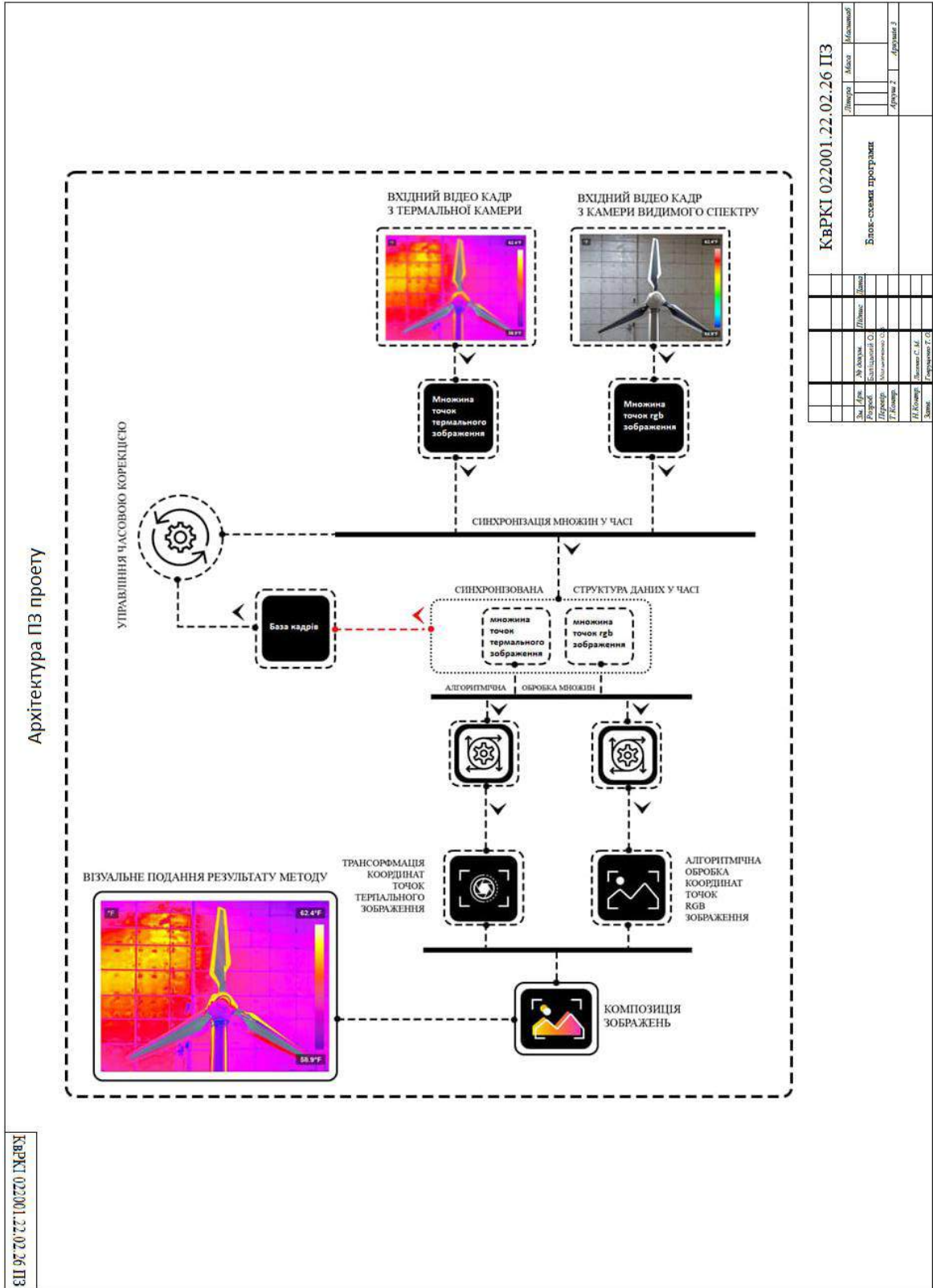
40. Failure analysis of gas and wind turbine blades: A review . A.-H. I. Mourad et al. Engineering Failure Analysis. 2023. Vol. 146. P. 107107. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107107>

41. IF1200 – Безпілотна система URL: <https://elistair.com/khronos-dronebox-get-started/> (дата звернення 13.05.2025)

					КвРКІ 022001.22.02.26 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Додаток А
(обов'язковий)

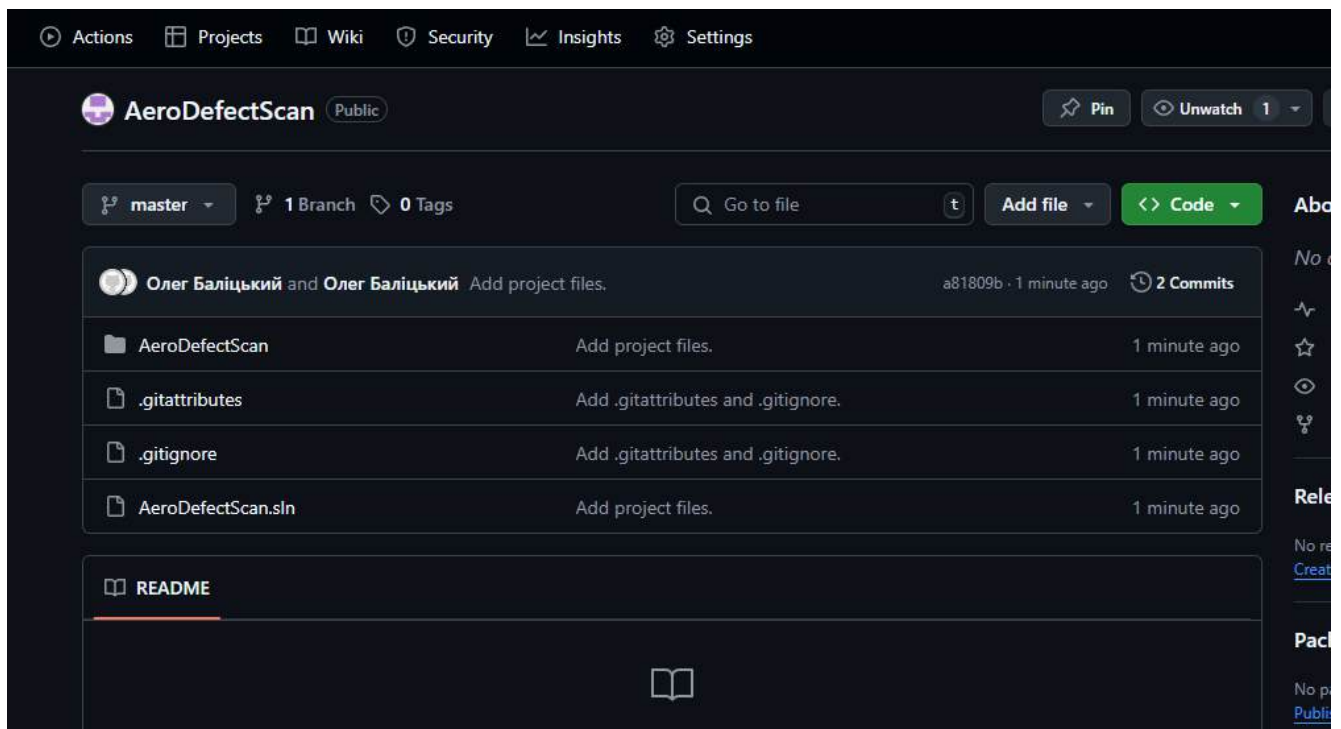
КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «АРХІТЕКТУРА ПЗ ПРОЄКТУ»



Додаток Г (обов'язковий)

ВИХІДНИЙ КОД

Вихідний програмний код, що використаний у дослідженні, є відкритим для загального доступу та доступним у відкритому репозиторії GitHub: <https://github.com/balis77/AeroDefectScan.git>



Репозиторій містить програмні модулі, що реалізують кіберфізичну систему для динамічного збору візуальних даних, розроблену в межах дисертаційного дослідження. Основна функція системи — автономне виконання повного циклу.

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: Олег БАЛІЦЬКИЙ

Співавтор:

Назва: Баліцький_Кіберфізична системи динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА **Експерт:**

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1:6.5%

Коефіцієнт подібності 2:2.3%

Мікропробіли: 7

Заміна букв: 6

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-05-30 07:05:55.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

Обґрунтування:

2025-05-30

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 2.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 11%

ID: 242496 Title: БКР Кіберфізична системи динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БІЛЛА Added in a DB: 2013-05-30 Authors: Олег БАЛІШЬКИЙ Heads: Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	111056	787	2399 (2%)	34 (4%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Здобувач: Баліцький Олег Іванович

Тема: Кіберфізична система динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 72

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень. Метою кваліфікаційної роботи є покращення якості динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА
 2. Висновок про відповідність роботи завданню кваліфікаційної роботи. Робота повністю відповідає поставленому завданню.
 3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи. У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження предметної області, пов'язаної з інспекцією об'єктів вітрової енергетики за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Зокрема, виконано аналіз сучасних кіберфізичних систем збору даних, розглянуто специфіку БПЛА як засобу збору візуальної інформації, визначено критерії вибору дронів для інспекцій, здійснено огляд сучасних моделей та наведено порівняльну характеристику. Також досліджено методи розпізнавання дефектів за допомогою RGB- та тепловізійних камер, а також згорткових нейронних мереж і методів глибокого навчання. Це дозволило закласти теоретичну основу для формування архітектури системи та методів автоматизованого аналізу.
- У другому розділі роботи розроблено архітектуру кіберфізичної системи збору візуальних даних для виявлення дефектів об'єктів вітроенергетики. Розглянуто метод автоматизованого обльоту БПЛА з урахуванням геометрії вітрових турбін та динамічного коригування траєкторій. Визначено апаратні компоненти системи,

описано типи сенсорів і методи аналізу критичності виявлених дефектів із використанням елементів нечіткої логіки. Також розглянуто використання програмного забезпечення MMDetection для обробки зображень, описано алгоритми сегментації та ідентифікації ушкоджень. У розділі використано сучасні технічні рішення, включаючи мультиспектральну обробку та глибоке навчання.

У третьому розділі здійснено реалізацію прототипу програмно-апаратної системи та проведено її тестування. Описано архітектуру розробленого рішення, структуру програмного забезпечення та склад апаратного комплексу. Проведено експериментальні дослідження, у ході яких порівняно ефективність виявлення дефектів за допомогою традиційних методів і запропонованої системи. Виконано аналіз точності розпізнавання на основі RGB та злитих мультиспектральних зображень, проаналізовано обмеження системи та запропоновано напрями її вдосконалення. Висновки підкріплено кількісними оцінками та прикладами результатів роботи прототипу, що демонструє високий ступінь практичної реалізації теоретичних рішень.

4. Позитивні сторони роботи. Висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи. У роботі недостатньо розкрито обґрунтування вибору моделей глибокого навчання. Також оцінювання запропонованого рішення проведено не повно.

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

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

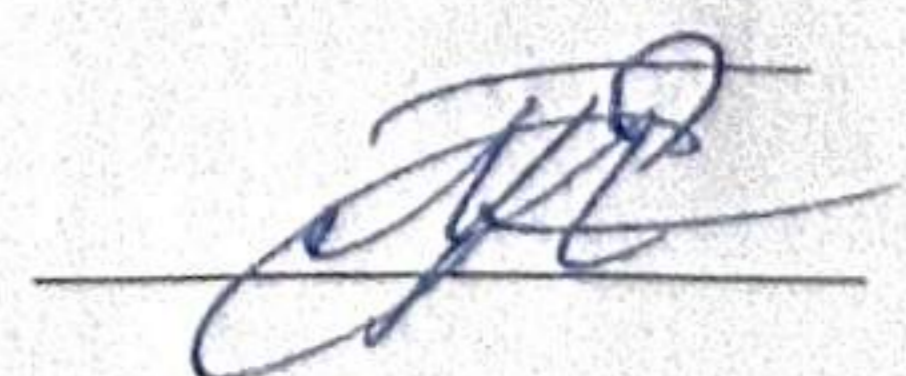
8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи бакалавра: добре

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

Гадюк Павло Михайлович, док. філ., старший викладач
кафедри комп'ютерних наук

“ ” _____ 2025 р.



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

Олега БАЛІЦЬКОГО

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2с-22-2

ЗАЯВА

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

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

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

29.05 2025 року

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

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

Назва: Кіберфізична системи динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики з використанням БПЛА

Автор: Олег БАЛІЦЬКИЙ

Спеціальність: 123– Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Олександр МЕЛЬНИЧЕНКО, д.ф, старший викладач

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, розмішені 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 розмішені 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 укріття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

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

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

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 6.51% і адресується до 32 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 2%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС



О МЕЛЬНИЧЕНКО

Андрій Нічепорук

Ольга ПАВЛОВА