

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: " Програмні рішення для моніторингу та керування безпілотними літальними апаратами "

Обсяг пояснювальної записки: 86 аркушів

Дата закінчення бакалаврської роботи 10 червня 2026р.

Підпис студента _____

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР. ІІ - 68.00.00.000 ІЗ

Група ІІ-22-3

Долинчук Володимир

2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інженерії програмного забезпечення

Долинчук Володимир Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 004.942

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**Програмні рішення для моніторингу та керування безпілотними
літальними апаратами** (назва роботи)

Інженерія програмного забезпечення

(назва освітньої програми)

121 - Інженерія програмного забезпечення

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня Долинчук В.П.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Крихівський Михайло Васильович, к.т.н, доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

доц. Бандура В.В.
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та
прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут, факультет інформаційних технологій
Кафедра інженерії програмного забезпечення
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 121 – Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою _____ **ІПЗ**
доцент. _____ **В.В. Бандура**

“ _____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Долинчук Володимир Петрович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема проекту (роботи) " Програмні рішення для моніторингу та керування безпілотними літальними апаратами "

керівник проекту (роботи) Крихівський Михайло Васильович, к.т.н, доцент

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 21 ” квітня 2026 р. № 179/7

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Результати і матеріали отримані під час проходження переддипломної практики

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

1. Аналіз вимог до програмного забезпечення

2. Аналіз вимог і постановка задачі

3. Проектування системи

4. Реалізація проекту

5. Тестування та впровадження

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1 Розподіл напрямків досліджень у сфері безпілотних літальних апаратів, які привернули значну увагу протягом останніх трьох років (рис. 1.1, ст. 20)

2 - Блок-схема системи управління (рис. 3.1, ст. 70)

4. Структура системного програмного забезпечення (рис. 3.2, ст. 76)

4 Ієрархічна структура автопілота (рис. 3.3, ст. 77)

5 Конструкція стабілізатора кутової швидкості типу PI (рис. 3.4, ст. 78)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

2. Дата видачі завдання 2026 р.

Керівник

_____ (підпис)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Визначення та обґрунтування теми роботи	17.01.2026	виконано
2	Огляд існуючих концепцій, рішень та сервісів в даній області	21.02.2026	виконано
3	Побудова моделі або алгоритму власного рішення	01.03.2026	виконано
4	Документування реалізації власного оригінального рішення вибраними засобами	21.04.2026	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки бакалаврської роботи	02.05.2026	виконано

Студент

_____ Долинчук В.П..
(підпис)

Керівник роботи

_____ Крихівський М.В..
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить 86 сторінок, 8 рисунків, 5 таблиці, список використаних джерел із 40 найменувань.

Метою роботи є дослідження принципів розробки програмних рішень для моніторингу та керування безпілотними літальними апаратами, а також аналіз підходів до побудови ефективних і надійних систем керування БПЛА.

Об'єкт дослідження: процеси функціонування та управління безпілотними літальними апаратами.

Предмет дослідження: методи, технології та програмні засоби для моніторингу, обробки телеметрії та керування БПЛА, включаючи системи взаємодії оператора з апаратом та інтеграцію інтелектуальних алгоритмів.

Результати дослідження: проведено аналіз сучасних систем БПЛА, досліджено принципи їх класифікації та функціонування, розглянуто методи збору й обробки даних, а також підходи до побудови програмних систем керування із використанням сучасних технологій штучного інтелекту.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи безпілотних літальних апаратів, їх класифікацію та сучасні тенденції розвитку галузі.

У другому розділі досліджено методи та інструменти моніторингу і керування БПЛА, зокрема підходи до організації людино-машинної взаємодії, обробки телеметричних даних та застосування інтелектуальних технологій.

У третьому розділі розглянуто процес розробки програмного рішення, описано архітектуру системи, інтеграцію апаратних і програмних компонентів, а також проведено оцінку ефективності реалізованого рішення.

Висновок: використання сучасних підходів до розробки програмних систем керування БПЛА дозволяє підвищити точність моніторингу, ефективність управління та адаптивність системи до змінних умов.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БПЛА, БЕЗПІЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ, МОНІТОРИНГ, КЕРУВАННЯ, ТЕЛЕМЕТРІЯ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, ПРОГРАМНА АРХІТЕКТУРА, ІоТ, РЕАЛЬНИЙ ЧАС.

ANNOTATION

The thesis consists of 86 pages, 8 figures, 5 tables, and a reference list with 40 sources.

The aim of the work is to study the principles of developing software solutions for monitoring and controlling unmanned aerial vehicles (UAVs), as well as to analyze approaches to building efficient and reliable UAV control systems.

Research object: processes of operation and control of unmanned aerial vehicles.

Research subject: methods, technologies, and software tools for monitoring, telemetry processing, and control of UAVs, including operator interaction systems and integration of intelligent algorithms.

Research results: an analysis of modern UAV systems was conducted, classification and operational principles were studied, methods of data collection and processing were examined, and approaches to building software control systems using modern technologies, including artificial intelligence, were considered.

The first section describes the theoretical foundations of unmanned aerial vehicles, their classification, and current development trends in the field.

The second section analyzes methods and tools for monitoring and controlling UAVs, including human-machine interaction, telemetry data processing, and the application of intelligent technologies.

The third section covers the development of the software solution, system architecture design, integration of hardware and software components, and evaluation of the effectiveness of the implemented system.

Conclusion: the use of modern approaches to UAV software system development improves monitoring accuracy, control efficiency, system adaptability to changing conditions, and the level of process automation.

KEY WORDS: UAV, UNMANNED AERIAL VEHICLES, MONITORING, CONTROL, TELEMETRY, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, SOFTWARE ARCHITECTURE, IoT, REAL-TIME SYSTEMS.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМ БПЛА	10
1.1 Загальні принципи функціонування безпілотних літальних апаратів	10
1.2 Класифікація та типи безпілотних літальних апаратів	16
1.3 Сучасні виклики та тенденції розвитку технологій БПЛА	18
1.4 Висновок по розділу	26
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ МОНІТОРИНГУ І КЕРУВАННЯ БПЛА	27
2.1 Людино-машинна взаємодія в системах керування БПЛА	27
2.2 Методи обробки даних та телеметрії в системах БПЛА	31
2.3 Використання штучного інтелекту та сучасних технологій у БПЛА	33
2.4 Висновок по розділу	43
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА, ІНТЕГРАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ	44
3.1 Проєктування програмної архітектури системи керування БПЛА	44
3.2 Апаратно-програмна інтеграція та особливості реалізації системи	59
3.3 Оцінка ефективності, результати експериментів та перспективи розвитку..	80
3.4 Висновок по розділу	84
ВИСНОВКИ	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97

					БР.ІІ – 68.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Програмні рішення для моніторингу та керування безпілотними літальними апаратами Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Долинчук В.П.					7	
Перевір.		Крихівський М.В.						
Реценз.		Григорчук Л.І.						
Н. Контр.		Піх М.М.						
Затверд.		Бандура В. В.				ІФНТУНГ ІІ-22-3		

ВСТУП

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА) набувають все більшого поширення у різних сферах діяльності, зокрема в оборонній галузі, сільському господарстві, логістиці, моніторингу інфраструктури та екологічному контролі. Швидкий розвиток технологій, зростання обсягів даних та необхідність оперативного реагування на зміни в реальному часі обумовлюють потребу у створенні ефективних програмних рішень для моніторингу та керування БПЛА. Сучасні виклики, пов'язані з обробкою телеметричних даних, забезпеченням стабільного зв'язку, автоматизацією керування та безпекою систем, підкреслюють важливість розробки програмного забезпечення, що відповідає вимогам надійності, масштабованості та адаптивності.

Актуальність теми зумовлена необхідністю створення сучасних програмних систем, які забезпечують ефективний моніторинг стану БПЛА, обробку даних у реальному часі та надійне керування апаратами в різних умовах експлуатації. Існуючі рішення часто мають обмеження щодо інтеграції з різними типами апаратного забезпечення, недостатню гнучкість або складність масштабування. У контексті зростаючого попиту на автономні системи та інтелектуальне керування, розробка нових підходів до створення програмних платформ для БПЛА є важливим завданням.

Метою роботи є розробка програмного рішення для моніторингу та керування безпілотними літальними апаратами, яке забезпечує збір і обробку телеметричних даних, підтримку взаємодії з оператором, а також ефективне керування апаратом у реальному часі.

Завданнями дослідження є аналіз предметної області та існуючих рішень у сфері БПЛА, визначення функціональних і нефункціональних вимог до системи, дослідження методів збору та обробки даних, вивчення підходів до реалізації людино-машинної взаємодії, проектування архітектури програмного забезпечення, реалізація основних модулів системи, проведення тестування та оцінка ефективності розробленого рішення.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об’єктом дослідження є процеси моніторингу та керування безпілотними літальними апаратами, що включають збір, передачу та обробку даних, а також взаємодію між оператором і системою.

Предметом дослідження є методи, моделі та програмні засоби, що використовуються для побудови систем моніторингу та керування БПЛА, включаючи архітектурні рішення, технології обробки даних та інтеграцію інтелектуальних алгоритмів.

Методи дослідження включають аналіз наукових джерел для визначення сучасного стану розвитку технологій БПЛА, порівняльний аналіз існуючих програмних рішень, моделювання архітектури системи, експериментальний метод для реалізації та тестування програмного забезпечення, а також аналіз отриманих результатів.

Розроблене програмне рішення передбачає можливість збору телеметричних даних, їх обробки в реальному часі, візуалізації інформації для оператора та забезпечення ефективного керування БПЛА. Особлива увага приділяється надійності системи, швидкодії, масштабованості та безпеці передачі даних. Очікується, що впровадження такого рішення дозволить підвищити ефективність використання БПЛА, покращити точність моніторингу та автоматизувати процеси управління.

Бакалаврська робота містить 86 сторінок, 8 рисунків, 5 таблиці, 3 розділи, висновки та список використаних джерел із 40 найменувань.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМ БПЛА

1.1 Загальні принципи функціонування безпілотних літальних апаратів

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) сьогодні стають дедалі популярнішими в широкій сфері застосування. Хоча в минулому вони розроблялися переважно для військових цілей, стає очевидним, що існує багато інших галузей, де вони можуть бути корисними. Розглянемо, наприклад, сільське господарство, де їх можна використовувати для польових спостережень або для розподілу хімікатів. Вони можуть патрулювати великі лісові масиви як пожежну охорону або ж використовуватися для спостереження за дорожнім рухом у містах [1]. У картографії невеликі БПЛА можна використовувати для автоматичної ландшафтної фотографії, що набагато економічніше порівняно з традиційною аерофотозйомкою. БПЛА також дуже цікаві для академічних досліджень, оскільки їх можна використовувати для різних цілей – як літаючі лабораторії, полігони для алгоритмів керування або як навчальні інструменти для студентів.

Таким чином, зростає попит на системи керування БПЛА, і нещодавно було (і продовжується) реалізовано багато проектів – комерційних чи академічних – спрямованих на розробку автопілота БПЛА. Вже досягнуто багато вражаючих результатів, і багато БПЛА, більш-менш автономних, використовуються різними організаціями. На жаль, вони досі недоступні для багатьох потенційних користувачів, оскільки стандартні продукти дуже дорогі, а академічні дослідники часто (зрозуміло) неохоче розкривають конкретні деталі конструкції своїх винаходів. Багато команд опублікували свої результати, але (наскільки нам відомо) жодна з них не опублікувала повну технічну документацію своїх систем керування для публічного використання. Отже, кожен новачок у цій галузі, не маючи змоги дозволити собі комерційний продукт, змушений починати свій проект з нуля, знову і знову. Складність усього

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесу проектування може багатьох з них знеохотити, і багато часу та ресурсів витрачається на повторне винаходження речей, які вже відомі більш досвідченим командам. Саме тому ми розробили RAMA.

RAMA розшифровується як Дистанційно керований аеромодальний автопілот. Це відкритий проект, метою якого є розробка універсальної легкої та компактної системи керування для малих БПЛА. RAMA призначена для використання переважно в академічному середовищі та слугуватиме гарною відправною точкою для тих, хто бажає створити власний БПЛА. Головною відмінною рисою проекту RAMA є його повна відкритість, тобто вся технічна документація, включаючи схеми підключення, друковані плати (PCB), вихідні коди програмного забезпечення, конструкції контролерів транспортних засобів, математичні моделі транспортних засобів та реальні дані польоту нашого БПЛА, доступна на вебсайті [24]. Таким чином, будь-хто з необхідною технічною підготовкою повинен мати змогу створити власну систему RAMA для будь-якої мети або використовувати RAMA як орієнтир для власного проекту, заощаджуючи багато роботи, яку він/вона інакше витратив би на розробку власної системи.

З інженерної точки зору, проектування автопілота БПЛА ставить перед нами багато викликів [2]. Це дуже складний міждисциплінарний процес, що охоплює дисципліни від проектування апаратного забезпечення, датчиків та вимірювань, програмування, мереж тощо до математичного моделювання та теорії управління, штучного інтелекту, обробки зображень та сигналів тощо. Тому він дуже цікавий для дослідників з різних галузей, і все ще існує багато можливостей для вдосконалення та нових підходів, оскільки ця галузь є відносно новою та невивченою.

Проект RAMA тривав з 2004 року і вже приніс деякі цікаві результати. З точки зору проектування апаратного забезпечення та системного програмування, він майже завершений. Наразі проводиться велика робота над математичним моделюванням та розробкою контролерів [3]. Вже було впроваджено та випробувано кілька стабілізуючих контролерів з багатообіцяючими

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результатами, а також виконано десятки тестових польотів. Проект вичерпно задокументовано на вебсайті проекту [24].

Штучний інтелект (ШІ) набуває дедалі більшого значення в різних секторах завдяки своїм трансформаційним можливостям, таким як робототехніка, виробництво та автоматизація, охорона здоров'я [1], кібербезпека [2], освіта [3], енергетика та комунальні послуги [4 , 5] , розумні міста [6] , обробка природної мови та взаємодія людини з комп'ютером [7], сільське господарство [8], транспорт та логістика [9]. Аналогічно, ШІ відіграє вирішальну роль у безпілотних літальних апаратах (БПЛА), покращуючи їхні можливості в навігації [10], виявленні об'єктів [11] та плануванні місій [12].

Універсальність та ефективність БПЛА зробили їх дедалі популярнішими для широкого кола завдань. Оскільки попит на БПЛА продовжує зростати, вкрай важливо бути в курсі останніх розробок та досліджень у цій галузі. БПЛА привернули значну увагу наукової спільноти, що підтверджується численними оглядовими статтями [13-19], які досліджують різні аспекти розробки та дослідження БПЛА в різних сферах застосування. Кілька ключових областей викликали особливий інтерес до БПЛА [18, 20, 21] , включаючи використання апаратного та програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом у новітніх БПЛА [22-24], проектування та оптимізацію каркаса [25, 26] , системи керування [27, 28 , як традиційні [29] , так і сучасні [30, 31] способи зв'язку (такі як мережі 5G), інтеграцію штучного інтелекту [32], алгоритми розпізнавання та виявлення, а також стратегії планування шляху [33]. Ці галузі відіграють ключову роль у розвитку технології БПЛА та є критично важливими об'єктами дослідження як для дослідників, так і для практиків.

Завдяки широкому спектру піддоменів та великій масштабності досліджень БПЛА, у поєднанні зі значними інвестиціями в цю багатогранну галузь, виникло кілька важливих дослідницьких питань. До них належать міждисциплінарний характер досліджень БПЛА, виклики та можливості, що надаються технологією БПЛА, та майбутні напрямки досліджень БПЛА [34]. Галузь БПЛА зазнала швидкого зростання та привернула увагу дослідників у

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

всьому світі. Завдяки своїм різноманітним піддоменам та експансивному характеру, ця галузь стала динамічною та активною областю досліджень, що залучає значні інвестиції. Як дослідники в цій галузі, ми постійно шукаємо відповіді на актуальні дослідницькі питання. Ми усвідомлюємо необхідність вичерпного посібника з орієнтування в широкому спектрі варіантів, доступних у дослідженнях БПЛА [35].

Швидке зростання та широке застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) породили кілька важливих дослідницьких питань. Одне з цих питань стосується міждисциплінарного характеру досліджень БПЛА. БПЛА передбачають поєднання різних дисциплін, включаючи аерокосмічну інженерію, інформатику, робототехніку та дистанційне зондування. Розуміння взаємодії між цими дисциплінами та визначення ефективних стратегій співпраці мають вирішальне значення для розвитку технології БПЛА [34]. Ще однією важливою сферою дослідження є вивчення проблем та можливостей, що надаються технологією БПЛА. Хоча БПЛА пропонують численні переваги, такі як підвищена ефективність, економічна ефективність та розширені можливості збору даних, вони також стикаються з такими проблемами, як регуляторні рамки, проблеми конфіденційності та проблеми безпеки. Дослідження цих проблем та пошук рішень сприятиме відповідальній та ефективній інтеграції БПЛА в суспільство [35]. Як дослідники в галузі БПЛА, ми усвідомлюємо важливість вирішення цих дослідницьких питань. Наша мета - надати вичерпний посібник, який орієнтується в широкому ландшафті досліджень БПЛА. Синтезуючи найновіші висновки та знання з різних підгалузі, ми сподіваємося надати цінний ресурс для дослідників та практиків у цій динамічній галузі [4]. Завдяки співпраці та обміну знаннями ми можемо колективно розвивати технологію БПЛА та розкрити її повний потенціал у широкому спектрі застосувань.

У сфері безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або дронів існує кілька актуальних дослідницьких питань. Ключовим серед них є дослідження того, як ми можемо підвищити автономність БПЛА, інтегруючи машинне навчання та штучний інтелект у їхні системи для покращення функціональності та прийняття

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рішень [34]. Удосконалення систем навігації та управління для точних маневрів у непередбачуваних умовах є важливою сферою уваги, як і розробка передових систем «виявлення та уникнення» для надійного виявлення перешкод. Вивчається застосування ройового інтелекту в БПЛА для полегшення спільних завдань та впровадження ефективних алгоритмів [35]. Дослідники також вивчають можливість продовження терміну служби акумулятора БПЛА та досліджують ефективні стратегії управління живленням та альтернативні джерела енергії. Можливість збільшити вантажопідйомність БПЛА без шкоди для ефективності чи маневреності, а також те, як дрони можна адаптувати для певних типів корисного навантаження, перебуває під пильною увагою. Не менш важливими є проблеми безпеки, пов'язані з системами БПЛА, від потенційних кібератак або захоплення, а також заходи щодо захисту конфіденційності особистої інформації від неправомірного використання БПЛА, здатних до спостереження. Виникає безліч питань щодо того, як безпілотні літальні апарати можна безпечно інтегрувати в переповнений повітряний простір, особливо в міських умовах або поблизу аеропортів, і які зміни потрібні в системах управління повітряним рухом для їх врахування. Також обговорюються регуляторні наслідки широкого використання безпілотних літальних апаратів, зосереджуючись на тому, як закони та нормативні акти повинні адаптуватися для регулювання використання безпілотних літальних апаратів [5]. Нарешті, заглиблюється аспект взаємодії людини з безпілотним літальним апаратом з точки зору безпечного та ефективного проектування взаємодії з людиною та покращення взаємодії з користувачем. Кожне з цих дослідницьких питань являє собою захопливий виклик у формуванні майбутнього технології безпілотних літальних апаратів.

У відповідь на ці потреби, ця робота слугує вичерпним посібником для нових дослідників, які заглиблюються в багатогранні та широкі підгалузі досліджень БПЛА. Визнаючи величезний обсяг цієї галузі, посібник має на меті створити міцну основу для дослідників-початківців, надаючи ретельний огляд та дослідження кожної підгалузі. Він охоплює популярні класифікації БПЛА [36],

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

які класифікують БПЛА на основі їх розміру, дальності польоту та тривалості служби. Окрім охоплення класифікацій БПЛА, ця робота надає огляд ключових аспектів, таких як архітектура апаратного забезпечення, останні тенденції досліджень, ініціативи з відкритим кодом та програмні інструменти, що використовуються в розробці та дослідженні БПЛА. Напрямок досліджень БПЛА зазнав значного зростання в останні роки, і ця робота ретельно аналізує ці тенденції та досліджує взаємозв'язки між різними напрямками досліджень. Критичні області, розглянуті в роботі, включають зв'язок та антени, Інтернет речей (IoT), виявлення, керування та автономний політ літаків, сприйняття та сенсорне сприйняття, енергоефективний політ, взаємодію людини та БПЛА, поведінку рою та багато іншого [18 , 20 , 21]. Примітно, що в роботі підкреслюється значний вплив використання БПЛА в дослідженнях на тваринах, що дозволяє здійснювати неінвазивний моніторинг, точний збір даних та зменшувати порушення середовищ існування дикої природи [19 , 37]. Надаючи всебічний огляд та синтезуючи достовірні джерела, ця робота надає дослідникам необхідні знання та ресурси для здійснення значного внеску в галузь досліджень БПЛА. Вона спрямована на сприяння дослідженням, інноваціям та співпраці, що зрештою сприятиме розвитку та розкриттю потенціалу технології БПЛА.

У цій роботі досліджуються потенційні напрямки відкритого розвитку для БПЛА, включаючи інтеграцію штучного інтелекту [32], моніторинг навколишнього середовища, збереження природи, мініатюризацію, роїння та кооперативне керування [13, 14, 17, 21] , а також системи трансформації. Розробка систем керування літальними апаратами є ключовим аспектом дослідження БПЛА, що вимагає розгляду відповідних алгоритмів керування та загальноживаних методів [27 , 28], що надає цінну інформацію про системи керування БПЛА. Основний внесок цього дослідження полягає в наступному:

- Вичерпна колекція відповідних джерел, пов'язаних з сферою дронів, що слугує надійним та доступним джерелом для дослідників у цій галузі.
- Аналіз та прогнози, отримані за допомогою ретельного наукового підходу щодо найактивніших та найшвидше зростаючих напрямків досліджень

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у галузі БПЛА за останні три роки. Аналіз базується на темпах зростання на рік та прискоренні, що підтверджується вагомими доказами.

- Визначення потенційних напрямків розвитку БПЛА, що пропонує цінні знання та ідеї для майбутніх досліджень. Систематичний розгляд питань відповідного алгоритму керування БПЛА, що забезпечує поглиблений аналіз цього критичного аспекту дослідження БПЛА.

- Огляд високорівневого програмного забезпечення для розробки БПЛА, отриманий за допомогою систематичного процесу класифікації, слугує доступним посібником з доступних варіантів у цій галузі досліджень БПЛА.

- Ретельне вилучення найвизначніших напрямків досліджень у галузі БПЛА

протягом останніх трьох років, використовуючи науково обґрунтовану методологію для всебічного розуміння сучасного стану досліджень БПЛА.

Презентація числового аналізу взаємозв'язків між напрямками досліджень БПЛА, що пропонує чітке розуміння сучасного стану досліджень БПЛА та сприяє ефективному плануванню майбутніх дослідницьких зусиль у галузі БПЛА [6].

1.2 Класифікація та типи безпілотних літальних апаратів

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), також відомі як дрони, можна класифікувати за кількома факторами, такими як принцип польоту, призначення, вага, рушійна система, керування, діапазон висоти польоту, конфігурація, призначення, спосіб запуску, корисне навантаження, рівень автономності, розмір, тривала тривалість роботи та дальність польоту. Загальні класифікації БПЛА такі:

- Принцип польоту: Ця категорія включає безпілотні літальні апарати з фіксованим крилом, гвинтокрилі, гібридні, махові крила та інші типи БПЛА, які відрізняються своїм механізмом польоту.

- Місія: БПЛА можна класифікувати залежно від їхнього призначення,

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

такого як розвідка, спостереження, атака, транспортування, пошуково-рятувальні дії тощо.

- Вага: БПЛА можна класифікувати за їхньою вагою, наприклад, як мікро-БПЛА, малі БПЛА, тактичні БПЛА, БПЛА середньої висоти з великою тривалістю польоту (MALE), БПЛА великої висоти з великою тривалістю польоту (HALE) тощо.

- Рушійна сила: БПЛА можуть живитися від електрики, палива, сонячної енергії або інших джерел.

- Управління: БПЛА можуть бути дистанційно керованими, автономними, напіваавтономними або мати інші типи управління.

- Діапазон висот польоту: БПЛА можна класифікувати за їх діапазоном висот, наприклад, як низьковисотні БПЛА, високовисотні БПЛА та стратосферні БПЛА.

- Конфігурація: БПЛА можуть мати різні конфігурації, такі як монороторні, багатороторні, з похилим ротором, з похилим крилом та інші.

- Призначення: БПЛА можуть мати різне призначення, таке як військове, цивільне, комерційне, промислове, наукове тощо.

- Спосіб запуску: БПЛА можуть запускатися з землі, повітря, моря або використовувати інші типи методів запуску.

- Корисне навантаження: БПЛА можуть перевозити різні корисні навантаження, такі як датчики, камери, системи зв'язку, зброю, вантажі тощо.

- Рівень автономності: БПЛА можуть мати різні рівні автономності, такі як повністю автономний, напіваавтономний, керований людиною та інші.

- Розмір: БПЛА можуть мати різні розміри, такі як міні-БПЛА, портативні БПЛА, переносні БПЛА, БПЛА, що встановлюються на транспортних засобах, тощо.

- Витривалість: БПЛА можуть мати різні рівні витривалості, такі як БПЛА короткої тривалості, БПЛА тривалої тривалості, БПЛА надтривалої тривалості тощо.

- Дальність польоту: БПЛА можуть мати різні рівні дальності польоту,

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

такі як БПЛА малої дальності, БПЛА середньої дальності, БПЛА далекої дальності тощо.

Ці класифікації дозволяють нам класифікувати БПЛА та зрозуміти їхні можливості, обмеження та потенційне застосування. Постійний розвиток та еволюція технології БПЛА призвели до створення нових класифікацій та розмиття традиційних меж між ними.

1.3 Сучасні виклики та тенденції розвитку технологій БПЛА

Основною метою цієї роботи було оцінити останні тенденції в дослідженнях БПЛА за останні три роки, використовуючи базу даних Scopus як надійне джерело. Запити до бази даних здійснювалися за допомогою відповідних ключових слів, таких як «дрон», «БПЛА», «безпілотний літальний апарат» та «безпілотні авіаційні системи» [7]. Отримані результати були ретельно проаналізовані, щоб визначити основні напрямки досліджень у цій галузі. Кількість наукових публікацій, пов'язаних з кожним напрямком дослідження, була використана як показник його значущості та впливу. Цей комплексний аналіз надає вичерпний огляд поточного стану досліджень БПЛА та висвітлює найперспективніші напрямки для майбутніх досліджень. Отримавши цінну інформацію про переважаючі сфери уваги в дослідницькій спільноті БПЛА, ми можемо краще зрозуміти потенціал цієї технології та її глибокий вплив у різних сферах.

Було проведено систематичний пошук у базі даних Scopus з використанням заздалегідь визначених ключових слів у полях назви, анотації та ключових слів. Пошук дав загалом 47 635 посилань, опублікованих у галузі БПЛА між 2020 і 2023 роками. Наведена нижче діаграма ілюструє напрямки дослідження, отримані за формулою: (TITLE-ABS-KEY (бпла) АБО TITLE-ABS-KEY (дрон) АБО TITLE-ABS-KEY (безпілотний ТА повітряний ТА транспортний засіб).

Протягом останніх трьох років спостерігається сплеск дослідницьких

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зусиль у галузі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), досліджуються різні галузі. Антени, виявлення повітряних суден, дистанційне зондування, глибоке навчання (DL), навчання з підкріпленням (RL), машинне навчання (ML), керування повітряними суденцями, Інтернет речей, траєкторії, використання енергії та енергоефективність стали найвизначнішими напрямками досліджень.

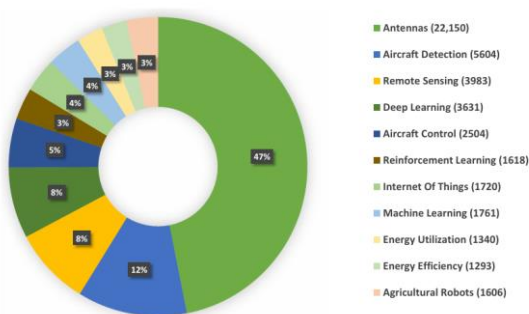


Рисунок 1.1 - Розподіл напрямків досліджень у сфері безпілотних літальних апаратів, які привернули значну увагу протягом останніх трьох років.

Розробка вищезгаданих інструментів штучного інтелекту зробила революцію в галузі БПЛА, що призвело до покращення продуктивності в таких сферах, як виявлення об'єктів, оптимізація траєкторії та планування місій. Крім того, дослідження взаємодії людини та БПЛА, поведінки рою, зондування навколишнього середовища, безпеки та надійності, інтеграції з іншими платформами, розробки для конкретних застосувань, а також правових та етичних питань також привернули значну увагу в останні роки.

Напрямок досліджень антен у сфері БПЛА отримав найбільшу увагу, опубліковано 22 150 документів, включаючи статті в журналах, книги та доповіді на конференціях. Ця галузь має тісні зв'язки з іншими дослідницькими напрямками, такими як виявлення повітряних суден, дистанційне зондування, штучний інтелект, Інтернет речей та керування повітряними суденцями. Штучний інтелект – це галузь досліджень, яка найбільше взаємодіє з антенами в

БПЛА, опубліковано 7010 документів, далі йдуть виявлення повітряних суден з 5604 документами, дистанційне зондування з 3983 документами,

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування повітряними суденцями з 2504 документами та Інтернет речей з 1720 документами, а також використання та ефективність енергії, що також приваблюють дослідників, з 1340 та 1293 документами відповідно, у сфері БПЛА. Крім того, значну увагу привернули сільськогосподарські роботи з 1606 документами. Взаємозв'язки між цими дослідницькими напрямками зображено на рисунку 1.2 та детальніше розглянуто в таблиці. 1.1 .

Таблиця 1.1

Визначення напрямків досліджень у сфері безпілотних літальних апаратів:
вивчення нових напрямків та взаємозв'язків між ними.

Напрямок дослідження	Antennas	Aircraft Detection	Remote Sensing	AI	IoT	Aircraft Control
Антени	22.150	3749	2176	3380	1092	1707
Виявлення літаків	3749	5604	0462	1343	0133	0758
Дистанційне зондування	2176	0462	3983	0707	0063	0
Штучний інтелект	4231	2203	0777	7010	0512	0294
IoT (Інтернет речей)	1092	0133	0063	0365	1720	0043
Керування літаками	1707	1152	0	0311	0043	2504

Ці результати свідчать про суттєве перекриття між напрямками досліджень у технології БПЛА, що може призвести до більш інтегрованих та ефективних рішень у майбутньому. Дані були зібрані 14 березня 2023 року.

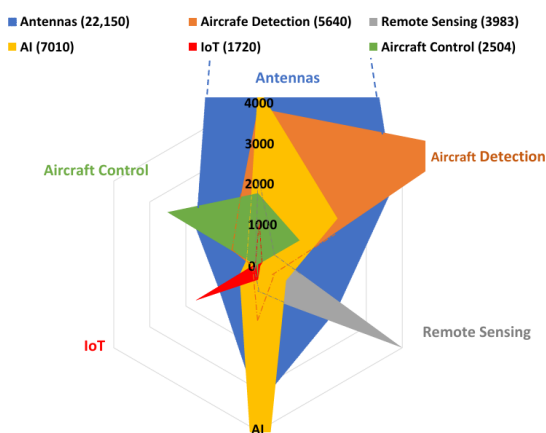


Рисунок 1.2 - Огляд напрямків досліджень БПЛА та взаємодії між ними
за останні три роки

Зв'язок та антени

Передача та прийом сигналів є важливими для роботи БПЛА, що робить антени критичним компонентом у їхній конструкції. Для застосувань БПЛА, таких як зв'язок, антени повинні бути легкими, компактними та достатньо міцними, щоб витримувати суворі умови навколишнього середовища. Нещодавні дослідження антен БПЛА зосереджені на розробці передових технологій для підвищення продуктивності БПЛА. Дослідники вивчають підходи машинного навчання (ML) та навчання ділянці (DL) для проектування та оптимізації антен, а також проектують антени з високим коефіцієнтом посилення, широкосмугові та багатопроменеві антени та інтегрують їх з іншими підсистемами, такими як системи живлення та керування. Таблиця 1.2 наведено порівняння різних комунікаційних технологій для FANET.

Таблиця 1.2

Порівняння різних технологій зв'язку для мереж FANET

Технологія	Стандарт	Швидкість (Data Rate)	Дальність (Range)
WiFi	802.11 a/b/n/g/ac	від 2 Mbps до 866.7 Mbps	до 100–250 м
ZigBee	802.15.4	до 25 kbps	до 100 м
Bluetooth V5	802.15.1	до 2 Mbps	до 200 м
LoRaWAN	IEEE 802.15.4 g	до 50 kbps	до 15 км
Sigfox	-	до 100 bps	до 30 км
NB-IoT	-	до 250 kbps	до 35 км
Cellular (Мобільний зв'язок):			
3G	HSPA+	до 21.1 Mbps	Широка зона (Wide area)
4G	HSPA+	до 100 Mbps	Широка зона
5G	mMTC / URLLC	до 1 Gbps	Широка зона
B5G (Beyond 5G)	eMBB/URLLC	до 100 Gbps	Широка зона
6G	MBRLLC / HCS	до 1 Tbps	Широка зона

DM: Мобільність пристрою; LCY: Затримка; Y: ТАК; DCD: Залежить від класу пристрою; ST: Тип спектру; UL: Без ліцензії; L: Ліцензований; NT: Тип мережі.

Також вивчається мініатюризація антен та штучного інтелекту для

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розробки менших та гнучкіших БПЛА з розширеними можливостями. Крім того, дослідження нових матеріалів та методів виробництва, таких як 3D-друк, мають великий потенціал для створення ефективних та недорогих антен для БПЛА. Загалом, розвиток технології БПЛА та розробка більш ефективних та результативних систем БПЛА для різних застосувань залежать від продовження досліджень антен БПЛА.

Літаючі ad hoc мережі (FANET) – це бездротові комунікаційні мережі, що складаються з дронів. FANET забезпечують зв'язок та співпрацю між дронами децентралізовано, без залежності від стаціонарної інфраструктури. FANET призначені для роботи в небі та пропонують такі переваги, як покращене покриття, підвищена мобільність та доступ до віддалених або важкодоступних районів. FANET використовують технології бездротового зв'язку та спеціалізовані протоколи для встановлення та підтримки з'єднань між дронами, що полегшує обмін даними та повідомленнями. Оглянувши велику літературу, ми витягли інформацію, представлену в таблиці. 1.2. Це забезпечує всебічне порівняння різних комунікаційних технологій, що використовуються у FANET .

Інтернет речей

Інтеграція БПЛА з Інтернетом речей відкрила нові можливості для збору, аналізу та комунікації даних у різних галузях. Поєднуючи БПЛА та Інтернет речей, мережа підключених пристроїв, датчиків та БПЛА може збирати, обробляти та обмінюватися даними в режимі реального часу. Нещодавні дослідження БПЛА з підтримкою Інтернету речей були зосереджені на розробці ефективних та масштабованих протоколів зв'язку, мережевих архітектур та алгоритмів обробки даних , щоб забезпечити безперешкодну інтеграцію та сумісність між БПЛА та іншими пристроями Інтернету речей , такими як датчики та центри обробки даних. БПЛА з підтримкою Інтернету речей пропонують численні переваги, такі як підвищення ефективності та результативності різних застосувань та управління стихійними лихами. Наприклад, БПЛА, оснащені датчиками , можуть збирати дані про стан сільськогосподарських культур, вологість ґрунту та температуру, які можна аналізувати в режимі реального часу

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для прийняття рішень щодо зрощення та удобрення [8]. Аналогічно, БПЛА можуть використовуватися для моніторингу стихійних лих та оцінки збитків, що дозволяє швидше та точніше реагувати. Незважаючи на величезний потенціал БПЛА з підтримкою Інтернету речей, існують значні проблеми, які потребують вирішення. Забезпечення безпеки та конфіденційності БПЛА з підтримкою Інтернету речей є критично важливим, а розробка ефективних механізмів обробки та аналізу даних є важливою. Однак інтеграція БПЛА з Інтернетом речей є перспективною галуззю досліджень, яка має потенціал для революціонування різних галузей та створення нових застосувань.

Виявлення літаків. Виявлення та уникнення зіткнень з пілотованими літальними апаратами є вирішальним завданням в експлуатації БПЛА, особливо у спільному повітряному просторі. Здатність виявляти літальні апарати є важливою для забезпечення безпечної експлуатації як пілотованих, так і безпілотних літальних апаратів [9]. Нещодавні дослідження в галузі виявлення літальних апаратів для БПЛА були зосереджені на розробці передових систем, які можуть виявляти та відстежувати літальні апарати в режимі реального часу за допомогою різноманітних датчиків, включаючи радар, LIDAR та оптичні камери. Однак виявлення малих літальних апаратів, таких як літаки загальної авіації, за допомогою традиційних радіолокаційних систем може бути складним завданням [10]. Щоб вирішити цю проблему, дослідники досліджують використання алгоритмів машинного навчання (ML), таких як DL, для підвищення точності та надійності систем виявлення літальних апаратів. Інтеграція систем виявлення літальних апаратів з навігаційними та контрольними системами БПЛА також є важливим напрямком досліджень. Ця інтеграція може забезпечити автоматичне коригування траєкторій польоту БПЛА у відповідь на виявлені літальні апарати, забезпечуючи безпечну експлуатацію як пілотованих, так і безпілотних літальних апаратів. Дослідження виявлення літальних апаратів для БПЛА мають вирішальне значення для широкого впровадження технології БПЛА в різних сферах, таких як доставка, інспекція та спостереження, одночасно забезпечуючи

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпечну експлуатацію у спільному повітряному просторі.

Керування та автономний політ

Автономний політ стосується здатності БПЛА працювати без втручання людини, що досягається завдяки використанню передових алгоритмів керування [17 , 28] та навігаційних систем, які дозволяють БПЛА літати, орієнтуватися та виконувати завдання автономно [17]. Автономний політ – це складна та проблематична галузь досліджень у галузі БПЛА, що вимагає інтеграції кількох технологій, таких як датчики, комп'ютерний зір та штучний інтелект. Метою є розробка БПЛА, які можуть виконувати складні завдання безпечним та ефективним способом, такі як точна посадка, без втручання людини. Одним із критичних завдань автономного польоту є розробка БПЛА, які можуть орієнтуватися та уникати перешкод у режимі реального часу, зберігаючи стабільність та контроль [11]. Це вимагає розробки передових алгоритмів керування та датчиків, які можуть точно виявляти та реагувати на зміни в навколишньому середовищі. Ще одним суттєвим викликом в автономному польоті є забезпечення безпеки та надійності БПЛА, особливо в умовах обмеженого втручання людини або в небезпечних зонах. Для вирішення цих проблем дослідники розробляють нові підходи до моніторингу, управління та діагностики БПЛА, включаючи інтеграцію резервних систем, механізмів безпеки та систем моніторингу в режимі реального часу. Метою автономного польоту є розробка БПЛА, здатних виконувати широкий спектр завдань безпечно, ефективно та надійно без необхідності втручання людини. Це має потенціал для революції в різних галузях промисловості, включаючи сільське господарство, логістику, військові операції, пошуково-рятувальні місії та застосування в цивільному будівництві.

Сприйняття та відчуття. Сприйняття та сенсорне сприйняття є ключовими можливостями БПЛА, що дозволяють їм збирати, обробляти та інтерпретувати інформацію з навколишнього середовища. Ці можливості є важливими для виконання БПЛА різних завдань, таких як навігація, картографування, інспекція та спостереження. Однак ці галузі досліджень є

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складними та проблемними, що вимагають інтеграції кількох технологій, включаючи датчики, комп'ютерний зір та штучний інтелект. Кінцева мета полягає в розробці БПЛА, які можуть сприймати та розуміти своє оточення та приймати обґрунтовані рішення на основі цієї інформації. Одним з ключових компонентів сприйняття та сенсорного сприйняття є інтеграція різних датчиків, таких як камери, LiDAR та радар [12]. Ці датчики надають БПЛА інформацію про навколишнє середовище, включаючи положення та розташування перешкод, рельєфу місцевості та інших об'єктів. Ще одним важливим аспектом сприйняття та сенсорного сприйняття є розробка алгоритмів комп'ютерного зору, які можуть обробляти та інтерпретувати інформацію, зібрану датчиками. Це включає ідентифікацію об'єктів, розпізнавання закономірностей та відстеження руху. Крім того, дослідники досліджують інтеграцію методів штучного інтелекту, таких як машинне навчання (ML) та навчання з дистанційним навчанням (DL) [32], щоб дозволити БПЛА навчатися на своєму досвіді та з часом покращувати свої можливості сприйняття та сенсорного сприйняття. Кінцевою метою сприйняття та сенсорного сприйняття в БПЛА є розробка систем, які можуть точно сприймати та розуміти своє оточення та приймати обґрунтовані рішення на основі цієї інформації. Це має потенціал для революції в різних галузях промисловості, включаючи сільське господарство, будівництво, цивільне застосування, морське застосування [39], гірничодобувну промисловість, військові операції та пошуково-рятувальні місії, такі як дистанційне зондування лісових пожеж. Крім того, дослідники досліджують потенціал кооперативного сприйняття з використанням кількох БПЛА для розширення їхніх можливостей.

Енергоефективний політ є критично важливою галуззю досліджень у галузі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), метою яких є розробка дронів, здатних літати протягом тривалого часу, споживаючи мінімальну кількість енергії. Досягнення енергоефективності є важливим для підвищення продуктивності та можливостей БПЛА, включаючи час польоту, вантажопідйомність та дальність польоту. Дослідники вивчають кілька підходів, таких як оптимізація аеродинамічного дизайну, легкі матеріали та інтеграція

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

альтернативних джерел енергії, таких як сонячна енергія. Зменшення ваги БПЛА є однією з ключових проблем у досягненні енергоефективного польоту. Для вирішення цієї проблеми дослідники вивчають використання легких матеріалів, таких як композити, та нових технологій виробництва, які можуть зменшити вагу БПЛА. Крім того, оптимізація рушійної системи має вирішальне значення для досягнення енергоефективності, включаючи використання більш ефективних двигунів та розробку нових технологій рушійних установок. Також досліджується інтеграція електричних та гібридних рушійних систем, які пропонують покращену енергоефективність порівняно з традиційними двигунами внутрішнього згоряння. Ще однією сферою досліджень є інтеграція альтернативних джерел енергії, таких як сонячна енергія [13]. Це включає розробку нових легких сонячних панелей та систем накопичення енергії, здатних забезпечувати живлення протягом тривалого часу. Енергоефективний політ має потенціал значно покращити можливості та продуктивність БПЛА, відкриваючи нові можливості та способи використання. Однак, передача великих обсягів даних під час зв'язку та спостереження може призвести до затримок та значного споживання енергії. Таким чином, у цьому контексті використовуються глибоке навчання з підкріпленням (DRL) та інші підходи штучного інтелекту.

1.4 Висновок по розділу

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи систем безпілотних літальних апаратів. Проаналізовано загальні принципи функціонування БПЛА та визначено основні компоненти їх роботи. Досліджено класифікацію та типи безпілотних літальних апаратів залежно від призначення, конструктивних особливостей і способів керування. Також розглянуто сучасні виклики та тенденції розвитку технологій БПЛА, зокрема питання автономності, безпеки та інтеграції інтелектуальних систем. Отримані результати формують теоретичну основу для подальшого дослідження методів і програмних засобів моніторингу та керування БПЛА.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 . МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ МОНІТОРИНГУ І КЕРУВАННЯ БПЛА

2.1 Людино-машинна взаємодія в системах керування БПЛА

Взаємодія людини та БПЛА – це нова галузь досліджень, яка досліджує взаємодію між людьми та БПЛА в різних контекстах, таких як розваги, освіта та дослідження. Вона має потенціал для революціонування кількох галузей. Взаємодія людини та БПЛА передбачає розробку нових технологій та інтерфейсів, які дозволяють людям використовувати інтуїтивні та інноваційні способи взаємодії з БПЛА. Ці технології включають віртуальну та доповнену реальність, жести та інші форми взаємодії людини та машини. Однією з основних проблем у взаємодії людини та БПЛА є розробка БПЛА, які можуть реагувати на дії людини в режимі реального часу, зберігаючи стабільність та контроль. Це вимагає інтеграції передових алгоритмів керування та датчиків, а також розробки нових зручних інтерфейсів людини та машини [14]. Ще однією проблемою у взаємодії людини та БПЛА є забезпечення безпеки та надійності БПЛА, особливо в сценаріях, коли втручання людини обмежене. Було запропоновано численні підходи до керування БПЛА за допомогою природної мови, жестів рук та фізичних рухів. Були розроблені інтелектуальні системи взаємодії людини та БПЛА, що використовують методи машинного навчання (ML) та навчання ділянці (DL) для розпізнавання жестів та забезпечення ефективного керування БПЛА. Крім того, у деяких дослідницьких роботах запропоновано нові архітектури, які дозволяють користувачам керувати БПЛА за допомогою природних рухів тіла. Поряд з технічними підходами, кілька досліджень досліджували людські фактори та проблеми, пов'язані з використанням БПЛА, такі як інтерфейси користувача, навчання та робоче навантаження. Ще однією активною сферою досліджень взаємодії людини та БПЛА є розуміння прийняття рішень людиною під час керування БПЛА, особливо в пошуково-рятувальних програмах. Це підкреслює важливість

					БР.ПІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

розробки інтуїтивно зрозумілих та ефективних систем взаємодії людини та БПЛА, які можна використовувати в різних областях та застосуваннях. В оглядових роботах розглянуто сучасний стан взаємодії людини та БПЛА, наприклад, оглядовий огляд, що визначає такі галузі, як розваги, транспорт та громадська безпека, а також інший огляд, що надає огляд різних інтерфейсів керування, методів розпізнавання жестів та методів автономної роботи.

Крім того, у літературі досліджувалися людські фактори та проблеми, пов'язані з використанням БПЛА, включаючи питання, пов'язані з інтерфейсами користувача, навчанням та робочим навантаженням. Розуміння прийняття рішень людиною під час керування БПЛА є активною сферою досліджень, особливо в пошуково-рятувальних програмах. Це підкреслює важливість розробки інтуїтивно зрозумілих та ефективних систем взаємодії людини та БПЛА, які можна використовувати в широкому спектрі областей та застосувань.

Поведінка рою

Ройова поведінка – це галузь досліджень у галузі БПЛА, метою якої є вивчення колективної поведінки груп, або «роїв», БПЛА. Потенційний вплив ройової поведінки на різні галузі, такі як військові операції, пошуково-рятувальні місії та моніторинг навколишнього середовища, стимулював розробку алгоритмів та систем управління, які дозволяють БПЛА координувати свої дії та працювати разом для досягнення спільної мети. Однією з проблем ройової поведінки є забезпечення ефективної співпраці між БПЛА під час адаптації до змінних умов та середовища. Щоб вирішити цю проблему, дослідники розробляють нові алгоритми для співпраці та координації, а також нові підходи до розподілу завдань та управління ресурсами [28]. Крім того, розробка алгоритмів, які дозволяють БПЛА автономно працювати та приймати рішення на основі свого середовища, включаючи інтеграцію методів штучного інтелекту, таких як машинне навчання та навчання на основі знань, є важливим аспектом ройової поведінки [33]. Архітектури зв'язку та управління є важливими для успішної роботи роїв БПЛА. Огляд архітектур зв'язку та керування роєм БПЛА [28] підкреслює необхідність масштабованих та гнучких архітектур для

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримки різних конфігурацій та завдань рою. Аналогічно, в огляді архітектур зв'язку рою БПЛА обговорюються проблеми та майбутні напрямки комунікації в роях БПЛА. Приклади архітектур зв'язку та керування, які можна використовувати в роях БПЛА, включають високорівневе керування роями БПЛА з оцінкою положення на основі RSSI та алгоритм самокоординації (SCA) для систем з кількома БПЛА, що використовують справедливую чергу планування.

Планування шляху є ще одним критичним аспектом поведінки рою. У нещодавньому огляді застосування штучного інтелекту до планування шляху в роях БПЛА [33] обговорюються останні розробки в цій галузі. Важливість планування руху в поведінці рою підкреслюється в іншій статті, яка розглядає планування руху роїв БПЛА, останні проблеми та підходи . Крім того, дослідження спільних роїв БПЛА щодо механізмів координації та контролю пропонує метод спільного планування руху роїв БПЛА. Ще одним важливим питанням, що розглядається в поведінці рою, є локалізація в роях БПЛА, яка вирішується за допомогою високорівневого керування роями БПЛА з оцінкою положення на основі RSSI. Нарешті, існують різні застосування поведінки рою, включаючи безперервне патрулювання в невизначених середовищах з використанням рою БПЛА та автономну навігацію рою дронів та відстеження кількох цілей у тривимірних середовищах з динамічними перешкодами. Підсумовуючи, дослідження поведінки рою БПЛА є швидкозростаючою галуззю досліджень, з численними досягненнями, досягнутими за останні роки. Розробка алгоритмів та систем керування для співпраці, координації, розподілу завдань та управління ресурсами була основним напрямком досліджень, як і інтеграція методів штучного інтелекту [15]. Архітектури комунікації та керування, планування шляхів, локалізація та стійкість також є важливими сферами досліджень. Численні застосування ройової поведінки демонструють значний потенційний вплив цієї технології на різні галузі промисловості.

Штучний інтелект

Використання штучного інтелекту (ШІ) мало значний вплив на галузь

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпілотних літальних апаратів (БПЛА) останніми роками. Дозволяючи БПЛА виконувати завдання автономно, ШІ зробив їх більш ефективними та результативними в різних сферах застосування. Деякі з найважливіших внесків та робіт, пов'язаних з використанням ШІ в БПЛА, включають виявлення об'єктів та їх відстеження, планування шляху [33], автономну навігацію, ройовий інтелект, аналіз зображень та відео та кібербезпеку.

Згорткові нейронні мережі (ЗНМ) та рекурентні нейронні мережі (РНМ), використовувалися для виявлення та відстеження літаків, об'єктів та об'єктів у реальному часі з БПЛА, із застосуванням у спостереженні, пошуку та рятуванні та сільському господарстві [8]. ШІ також дозволяє БПЛА автономно орієнтуватися в складних середовищах, уникати перешкод та приймати рішення в реальному часі на основі даних датчиків, із застосуванням у доставці, інспекції та спостереженні. Крім того, алгоритми ШІ використовувалися для координації поведінки кількох БПЛА, утворюючи "рій", який може виконувати завдання спільно [33], із застосуванням у пошуку та рятуванні, спостереженні та військових операціях.

Більше того, алгоритми штучного інтелекту використовувалися для аналізу зображень та відео, знятих БПЛА, витягуючи цінну інформацію, таку як розпізнавання об'єктів, семантична сегментація та виявлення аномалій. Ці можливості мають широкий спектр застосування в таких галузях, як сільське господарство, моніторинг навколишнього середовища та ліквідація наслідків стихійних лих. Крім того, ШІ використовувався для виявлення та запобігання кібератак на БПЛА, забезпечуючи їхню безпеку та захист, із застосуванням у військових операціях та комерційних БПЛА. Деякі помітні роботи, пов'язані з використанням ШІ в БПЛА, включають нещодавні приклади, які привернули увагу дослідницької спільноти. До них належать DRL для керування БПЛА, автономна посадка БПЛА з фіксованим крилом на основі зору, ройовий інтелект для спільного планування місій БПЛА, автономна навігація БПЛА в приміщенні та виявлення та відстеження об'єктів на основі ШІ для спостереження за БПЛА [16]. Ці приклади демонструють широкий спектр застосувань штучного

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтелекту в безпілотних літальних апаратах, включаючи навігацію, планування місій, виявлення та відстеження об'єктів, а також спостереження.

2.2 Методи обробки даних та телеметрії в системах БПЛА

Для проведення комплексного аналізу база даних Scopus була використана як основне джерело даних для вилучення відповідної інформації щодо напрямку досліджень БПЛА за останні три роки. Метою цього аналізу було (i) визначити основні відкриті проблеми; та (ii) надати уявлення про найактивніші та найшвидше зростаючі напрямки досліджень у галузі БПЛА за останні три роки [17]. Для досягнення цієї мети було проведено систематичний пошук у базі даних Scopus з використанням попередньо визначених ключових слів у полях назви, анотації та ключових слів з січня 2020 року по грудень 2022 року. Напрямки досліджень були окреслені на основі виявлених публікацій та результуючих траєкторій зростання були побудовані з урахуванням лінійної залежності між кількістю публікацій та часом ($y = ax + b$), де y – кількість публікацій, x – рік, а b – кількість публікацій за попередній рік. Параметр a відображає величину та темпи зростання, що спостерігаються з року в рік.

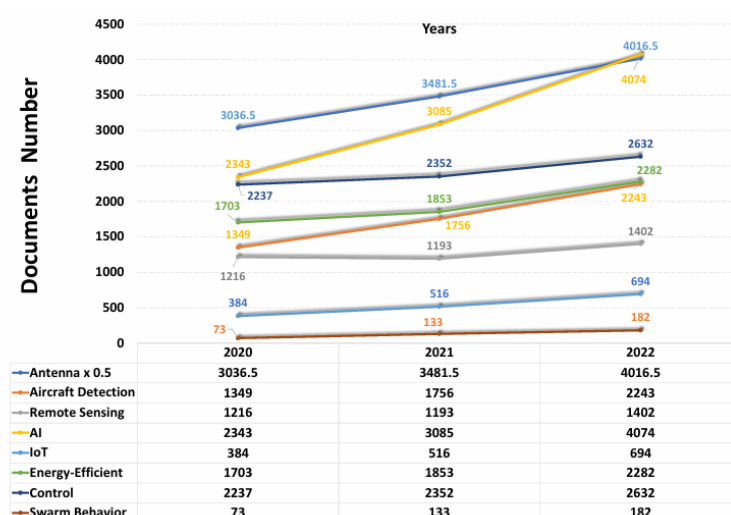


Рисунок 2.1 - Огляд динаміки розвитку напрямків досліджень у сфері безпілотних літальних апаратів за останні три роки.

Результати цього аналізу представлені на рисунку 2.1, що зображує траєкторії зростання кожного напрямку дослідження. Крім того, Таблиця У таблиці 3 наведено середні темпи зростання для кожного напрямку досліджень, щоб полегшити краще розуміння динаміки зростання в галузі БПЛА.

Таблиця 2.1

Прискорення розвитку напрямків досліджень у сфері безпілотних літальних апаратів

Напрямок дослідження	Швидкість росту/рік (К-сть документів/рік)	Прискорення росту
Antenna (Антени)	980	1.20
Aircraft detection (Виявлення літаків)	447	1.19
Remote sensing (Дистанційне зондування)	93	9.08
AI (Штучний інтелект)	865	1.33
IoT (Інтернет речей)	155	1.34
Energy efficiency (Енергоефективність)	289	2.86
Control (Керування)	197	2.43
Swarm (Ройові технології)	54	0.81

Прискорення зростання, показане в таблиці 3 демонструє високий ступінь ефективності у прогнозуванні областей інтересу, які привертають значну увагу дослідників у галузі БПЛА [18]. Ці прогнози пропонують нюансоване уявлення про розвиток та тенденції в цій галузі. Наприклад, галузь антен має значну кількість публікацій та вражаючі темпи зростання приблизно на 980 нових документів на рік. Однак коефіцієнт її зростання залишається відносно постійним на рівні 1,20. Натомість, галузь дистанційного зондування щороку переживає помітний сплеск інтересу, що відображається у прискоренні коефіцієнт зростання 9,08. Отже, ці результати дають цінну інформацію про найперспективніші напрямки досліджень у галузі БПЛА.

2.3 Використання штучного інтелекту та сучасних технологій у БПЛА

Відкритий напрямок розробки БПЛА передбачає створення спільної екосистеми, де розробники, дослідники та користувачі можуть разом працювати над створенням платформ, інструментів та стандартів з відкритим кодом для проектування, розробки та експлуатації БПЛА. Такий підхід забезпечує більшу інноваційність та гнучкість в галузі БПЛА [20], включаючи інтеграцію - алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для покращення можливостей автономного польоту та прийняття рішень. Подальші виклики та напрямки відкритих досліджень можна детальніше розглянути в наступних пунктах.

Інтеграція штучного інтелекту

Алгоритми штучного інтелекту революціонізують спосіб роботи БПЛА. Використовуючи ці алгоритми, БПЛА можуть досягти покращених можливостей автономного польоту та прийняття рішень , що може призвести до більш ефективної та безпечної роботи [19]. Односторонні алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання можуть бути використані в БПЛА шляхом розробки передових сенсорних систем. Наприклад, комп'ютерний зір та лідар можуть бути інтегровані в БПЛА для надання даних у режимі реального часу системі ШІ. Це дозволяє БПЛА приймати рішення на основі свого оточення та динамічно реагувати на зміни. Комп'ютерний зір може дозволити БПЛА розпізнавати об'єкти та людей у своєму середовищі, що може бути використано для підвищення безпеки та запобігання зіткненням. Тим часом лідар може надавати детальну інформацію про оточення БПЛА, включаючи відстань, розмір та швидкість об'єктів, що може бути використано для більш ефективної навігації в складних середовищах.

Ще один спосіб використання штучного інтелекту в БПЛА – це оптимізація траєкторій польоту. Використовуючи алгоритми машинного навчання, БПЛА можуть навчатися на досвіді минулих польотів та оптимізувати

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

свої маршрути для зменшення споживання енергії та підвищення ефективності. Цього можна досягти шляхом аналізу таких даних, як швидкість вітру, температура та інші фактори навколишнього середовища.

Генеративний ШІ та ChatGPT для БПЛА

Моделі обробки природної мови (NLP), такі як Chat Generative Pre-trained Transformer (ChatGPT), розроблені для розуміння введених природною мовою користувачів та генерації відповідей, подібних до людських. ChatGPT можна адаптувати до багатьох завдань робототехніки, таких як планування агентів високого рівня або генерація коду. Таким чином, він може служити інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом на основі мови між нетехнічними користувачами та БПЛА.

«Зусилля щодо інтеграції мови в робототехнічні системи значною мірою зосереджені на використанні моделей вбудовування мовних токенів, функцій мультимодальних моделей та функцій LLM для конкретних форм-факторів або сценаріїв. Застосування варіюються від візуальної навігації, взаємодії людини та робота на основі мови та керування маніпуляціями візуальною мовою». ChatGPT, наприклад, може використовуватися через бібліотеки API для реалізації багатьох завдань, таких як планування завдань з нульовим результатом у дронах, де він отримує доступ до функцій, які керують реальним дроном, та служить інтерфейсом між користувачем та дроном. Це може дозволити нетехнічним користувачам легко та безпечно керувати БПЛА без потреби у спеціалізованому навчанні.

Реальний дрон керувався за допомогою ChatGPT через окрему реалізацію API, яка пропонувала зручний інтерфейс природної мови між користувачем і роботом, дозволяючи моделі створювати складні структури коду для руху дрона, такі як кругові огляди та огляди газонокосарок. Використовуючи симулятор Microsoft AirSim, Chat-GPT також був застосований до симульованої області, де досліджувалася можливість використання моделі нетехнічним користувачем для керування дроном та виконання сценарію промислової інспекції. З фрагмента

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

видно, що ChatGPT може точно керувати дроном, зчитуючи введені користувачем дані на предмет геометричних підказок та призначення.

Моніторинг та охорона навколишнього середовища

Використання БПЛА для моніторингу та охорони навколишнього середовища є перспективним застосуванням цієї передової технології [38]. Ці безпілотні літальні апарати, оснащені камерами високої роздільної здатності та іншими передовими датчиками, пропонують величезний потенціал для широкого кола цілей, включаючи моніторинг популяцій диких тварин [40], відстеження змін в екосистемах та виявлення екологічних небезпек. Використовуючи можливості БПЛА в цих районах, ми можемо значно розширити нашу здатність збирати точні та надійні дані, тим самим отримуючи глибше розуміння загального стану здоров'я та благополуччя нашої планети. Така безцінна інформація дає нам змогу розробляти та впроваджувати ефективні стратегії охорони природи, забезпечуючи збереження та захист нашого навколишнього середовища для майбутніх поколінь. Використання дронів в екологічних та гляціологічних дослідженнях у таких регіонах, як Антарктида, зростає, як показують дослідження [37, 42]. Дрони сприяють детальному геоморфологічному картографуванню, точному моніторингу рослинності на великих територіях та оцінці показників здоров'я. Вони покращують ідентифікацію та характеристику кріосферних особливостей, включаючи підземні застосування, та революціонізують дослідження фауни, дозволяючи неінвазивний підрахунок та морфометрію різноманітних видів тварин [37]. Атмосферні дослідження за допомогою БПЛА дозволяють швидко та універсально збирати дані, включаючи збір аерозольних зразків. Розробка та розробка платформ, адаптованих до суворих умов Антарктики, мали вирішальне значення для успіху цих застосувань. БПЛА, здатні збирати фізичні зразки з віддалених або важкодоступних районів, вже доступні, а подальший прогрес в автономності та надійності підвищить їхню корисність для польових досліджень в Антарктиці [19]. Використання БПЛА для моніторингу та збереження навколишнього середовища служить як планетарним, так і людським інтересам.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Міська повітряна мобільність (UAM)

(БПЛА), галузь , що розвивається, має величезні перспективи для майбутнього транспорту. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) мають потенціал революціонізувати міський транспорт, пропонуючи швидку, ефективну та екологічну альтернативу традиційним наземним системам. Однак реалізація цього потенціалу вимагає значного технологічного прогресу в навігації, автономних польотах та системах безпеки. Крім того, розробка спеціалізованих систем управління повітряним рухом, призначених для вирішення унікальних проблем міського середовища, має вирішальне значення для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації БПЛА в густонаселених районах. З огляду на постійне зростання та інвестиції в цю галузь, БПЛА готові стати ключовим компонентом майбутніх міських транспортних систем.

Мініатюризація

У галузі безпілотних літальних апаратів мініатюризація є помітною тенденцією, яка зосереджена на розробці менших та компактніших дронів, здатних використовуватися в різних сферах. Ці сфери застосування охоплюють пошуково-рятувальні роботи, служби доставки, спостереження тощо [20]. Тим не менш, досягнення мініатюризації вимагає суттєвого технологічного прогресу, включаючи розробку компактних та ефективних рухових систем, а також легших та міцніших матеріалів. Отже, мініатюризація стала ключовою галуззю досліджень та розробок у галузі безпілотних літальних апаратів, відкриваючи нові можливості для використання дронів у широкому спектрі галузей.

Ройня та кооперативний контроль

Вісь відкритої розробки в галузі БПЛА зосереджена на створенні спільної екосистеми, яка об'єднує розробників, дослідників та користувачів для вдосконалення алгоритмів та методів ройового управління кількома БПЛА, що дозволяє їм виконувати складні завдання [28]. Ці завдання охоплюють широкий спектр застосувань, включаючи спостереження, пошуково-рятувальні операції та моніторинг навколишнього середовища. Для досягнення цієї мети необхідні значні технологічні досягнення, такі як розробка надійних протоколів зв'язку,

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

розподілених систем зондування та управління, а також адаптивних можливостей прийняття рішень. Наприклад, розробка ефективних протоколів зв'язку сприяє безперебійному обміну інформацією та координації між кількома БПЛА, дозволяючи їм ефективно працювати разом для досягнення спільних цілей. Аналогічно, розподілені механізми зондування та управління дозволяють кожному БПЛА виконувати конкретні завдання в рамках скоординованої системи, значно підвищуючи ефективність та результативність складних місій, що виконуються роями БПЛА. Крім того, впровадження адаптивних алгоритмів прийняття рішень надає БПЛА можливість приймати швидкі та точні рішення на основі даних у режимі реального часу, що ще більше розширює можливості роїв БПЛА в різних сценаріях.

Операції за межами візуальної лінії видимості (BVLOS)

Операції за межами візуальної лінії видимості (BVLOS) стосуються технологій, які дозволяють БПЛА працювати за межами візуальної лінії видимості їхнього пілота. Досягнення можливостей BVLOS вимагає розробки передових систем виявлення та уникнення, здатних виявляти перешкоди та уникати зіткнень. Крім того, для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації необхідні надійні протоколи зв'язку та управління. Для забезпечення широкого впровадження операцій BVLOS необхідно створити нормативно-правові бази для забезпечення дотримання стандартів безпеки та зменшення потенційних ризиків.

Далекі та висотні польоти

Ще одним напрямком розвитку в галузі БПЛА є розвиток далеких та висотних польотів. Це передбачає оснащення БПЛА можливістю літати протягом тривалого часу та на більших висотах. Для досягнення цієї мети існує потреба в розробці більш енергоефективних силових установок, здатних підтримувати тривалі польоти. Крім того, досліджується можливість інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі, в конструкції БПЛА для розширення їхньої дальності польоту та збільшення їхньої тривалості дії.

Безпека польотів

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки використання БПЛА продовжує зростати в різних сферах застосування, забезпечення безпеки польотів стало критично важливим питанням. У відповідь розробники активно працюють над інтеграцією нових технологій, які можуть підвищити безпеку експлуатації БПЛА. Наприклад, все більша увага приділяється розробці систем запобігання зіткненням, які можуть запобігти зіткненням у повітрі з іншими БПЛА, пілотованими літальними апаратами або перешкодами в навколишньому середовищі. Крім того, системи автоматичної посадки можуть допомогти зменшити ризик аварій під час посадки, тоді як бортові системи виявлення та уникнення перешкод можуть дозволити БПЛА виявляти та уникати перешкод під час польоту, зменшуючи ризик зіткнень. Такі технології мають вирішальне значення для забезпечення безпечного та відповідального використання БПЛА, оскільки вони можуть пом'якшити потенційні ризики та запобігти аваріям.

Можливості підвіски БПЛА з корисним навантаженням

Підвісне корисне навантаження БПЛА стосується розробки та оптимізації систем підвіски для БПЛА, здатних перевозити різні типи корисних вантажів, включаючи важчі предмети, такі як медикаменти, продукти харчування та інші товари першої необхідності [21]. Система підвіски відіграє вирішальну роль у забезпеченні стабільного польоту під час місій, що передбачають скидання корисного навантаження, оскільки вона допомагає пом'якшувати вібрації та забезпечує амортизацію для захисту корисного навантаження та чутливого обладнання на борту.

Останні досягнення в технології підвіски дронів зосереджені на покращенні продуктивності та ефективності систем підвіски, а також на їх інтеграції з іншими компонентами дрона. Деякі приклади цих досягнень включають використання передових матеріалів та технологій виробництва, розробку активних систем підвіски, які можуть адаптуватися до змін умов польоту в режимі реального часу, та інтеграцію систем підвіски з системами руху, керування та корисного навантаження для забезпечення безперебійної роботи та максимальної ефективності.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Більше того, останні досягнення в управлінні квадрокоптерами з підвішеними вантажами зосередилися на розробці нових алгоритмів та стратегій керування, які можуть впоратися з додатковою складністю та викликами, що виникають через підвішене корисне навантаження. У деяких недавніх дослідженнях запропоновано методи підвищення точності та стабільності квадрокоптерів з підвішеними вантажами, включаючи стратегії прогнозного керування та використання адаптивних алгоритмів навчання. Ці інновації в технології підвішеного корисного навантаження БПЛА призведуть до більш ефективних та надійних можливостей доставки та транспортування, що ще більше розширить застосування БПЛА в різних галузях.

Трансформованість або конвертованість

Трансформованість або конвертованість – це нова технологія в галузі безпілотних літальних апаратів, яка дозволяє їм змінювати свою форму або конфігурацію під час польоту. Цей прогрес має потенціал для підвищення універсальності та ефективності БПЛА, дозволяючи їм адаптуватися до різних операційних середовищ та місій. Існує кілька підходів до досягнення трансформованості БПЛА, зокрема:

Однією з важливих областей трансформації, яку ми дослідимо, є використання крил, що змінюють форму. Цей інноваційний підхід передбачає проектування крил, здатних змінювати свою форму під час польоту для підвищення ефективності та маневреності. Завдяки технології крил, що змінюють форму, дрони можуть адаптувати конфігурацію своїх крил до різних умов польоту, таких як зміни висоти, швидкості та напрямку вітру. Завдяки цим адаптивним крилам дрони можуть оптимізувати свої аеродинамічні характеристики та загальну ефективність, тим самим покращуючи свою дальність польоту, витривалість та стабільність. Існує кілька механізмів, що використовуються для досягнення крил, що змінюють форму, включаючи сплави з пам'яттю форми, інтелектуальні матеріали та механічні системи. Ці механізми дозволяють дронам регулювати кут крила, змінювати кривизну аеродинамічного профілю або навіть повністю змінювати форму крила. Одним із нестандартних

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прикладів технології крил, що змінюють форму, є "RoboSwift", розроблений Делфтським технологічним університетом у Нідерландах [22]. Цей невеликий дрон, що нагадує швидкого птаха за своєю природою, має здатність змінювати свої крила під час польоту, що дозволяє підвищити ефективність та зменшити шум. RoboSwift здобув значне визнання в науковій спільноті завдяки своїй інноваційній технології крил, що трансформуються, та потенційному застосуванню в різних галузях, таких як спостереження, моніторинг навколишнього середовища та дослідження дикої природи. Його чудові характеристики були висвітлені в численних дослідницьких роботах. Іншим помітним прикладом є «FlexFoil», розроблений американською інженерною фірмою FlexSys Inc. FlexFoil використовує унікальну технологію «задньої кромки, що трансформується», що дозволяє задній кромці крила згинатися та скручуватися у відповідь на зміни повітряного потоку. Ця конструктивна особливість покращує аеродинамічні характеристики дрона та його адаптивність до різних умов польоту, що призводить до підвищення ефективності. Використовуючи потужність технології крил, що трансформуються, дрони можуть революціонізувати галузь авіації, досягаючи більшої маневреності, дальності польоту та стабільності. Розвиток таких трансформаційних - можливостей відкриває нові можливості для різних галузей, від спостереження та моніторингу до досліджень та розвідки.

Концепція складних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оснащених складними крилами або крилами, являє собою цікаву область для дослідження. Ця конструктивна особливість призводить до зменшення загальних розмірів дронів, тим самим підвищуючи портативність та сприяючи більш спрощеному транспортуванню та зберіганню. Такі складні дрони, включаючи моделі Mavic Pro, DJI Mavic Air 2, Parrot Anafi, PowerVision PowerEgg X та Robotics EVO, здобули значну популярність завдяки своїй адаптивності та зручності. Здатність цих дронів легко складати крилами або крилами забезпечує гнучкість, дозволяючи користувачам транспортувати їх у компактних кейсах або сумках. Ця особливість не тільки покращує портативність, але й підвищує довговічність

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та захист дронів під час транспортування. Отже, потенційні пошкодження мінімізуються, що гарантує, що дрони добре захищені та готові до експлуатації в різних середовищах та сценаріях.

Далі, реконфігуровані планери представляють собою ще один напрямок трансформації БПЛА [23]. Завдяки реконфігурованим планерам дрони мають можливість змінювати свою форму або конфігурацію під час польоту, щоб адаптуватися до різних місій або операційних середовищ. Ця універсальність може включати зміну конфігурації крила, додавання або видалення корисного навантаження, або регулювання центру ваги. Завдяки використанню реконфігурованих планерів дрони можуть задовольняти широкий спектр вимог місій, що робить їх більш економічно ефективними та потужними порівняно з традиційними дронами фіксованої конструкції. Хоча реконфігуровані планери в БПЛА все ще є технологією, що розвивається, є кілька вартих уваги прикладів компаній та організацій, які активно розробляють такі дрони. Наприклад, - робототехніки з Університету Цюриха та EPFL розробили квадрокоптери, які мають складну конструкцію, що дозволяє їм змінювати свою форму в повітрі між конфігураціями "X" та "O". Ці інноваційні конструкції демонструють потенціал дронів з реконфігурованими планерами, демонструючи їхню адаптивність та маневреність у різних сценаріях польоту.

Крім того, значним розвитком технології БПЛА є використання пропелерів зі змінним кроком. Ці пропелери оснащені лопатями, які можуть регулювати свій кут або тангаж під час польоту. Пропелери зі змінним кроком, також відомі як пропелери з регульованим або керованим кроком, забезпечують вищий рівень контролю над польотом та продуктивністю дрона, особливо у складних або динамічних умовах. Змінюючи крок лопатей пропелера, дрон може точно налаштувати свою тягу та підйомну силу, що дозволяє йому підтримувати стабільний політ навіть за різних вітрових умов, висот або режимів польоту. Ця можливість значно підвищує маневреність, ефективність та загальну продуктивність дрона в широкому спектрі застосувань, включаючи аерофотозйомку, картографування та інспекцію. Пропелери зі змінним кроком

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зазвичай зустрічаються в більш просунутих або спеціалізованих БПЛА, таких як промислові або військові дрони, де точне керування та оптимальна продуктивність є вирішальними. Однак вони стають все більш доступними і в споживчих дронах, дозволяючи любителям та ентузіастам використовувати їхні переваги та насолоджуватися більшим контролем та універсальністю у своїх повітряних починаннях.

Нарешті, значним досягненням у технології БПЛА є інтеграція трансформованих роторів. БПЛА, оснащені трансформованими роторами, мають можливість змінювати конфігурацію своїх роторів під час польоту, що дозволяє їм адаптуватися до різних умов польоту або вимог місії. Це включає можливість змінювати кількість або орієнтацію роторів. Розробка трансформованих БПЛА має величезний потенціал для революціонування галузі безпілотних літальних апаратів. Це дозволяє БПЛА виконувати ширший спектр місій з підвищеною ефективністю та результативністю. Одним із чудових прикладів є VA-X4, який має чотири ротори, що можуть нахилитися вперед, переходячи з режиму вертикального зльоту та посадки (VTOL) у режим польоту вперед. Така конструкція дозволяє БПЛА досягати вищих швидкостей до 200 миль/год, що дозволяє йому ефективніше долати більші відстані. Ще одним помітним БПЛА з трансформованим ротором є Voliro Hexcopter, розроблений командою ETH Zurich. Цей гексакоптер використовує кілька роторів, здатних забезпечувати тягу в різних напрямках, що надає дрону можливість вільно рухатися та маневрувати в складних умовах. Greased Lightning GL-10 від NASA – ще один чудовий БПЛА з трансформованим ротором. Він може плавно перемикатися між режимом вертикального зльоту та посадки (VTOL) та режимом з фіксованим крилом, оптимізуючи ефективність під час польоту вперед. Цей БПЛА оснащений десятима електродвигунами, що живлять десять роторів, що дозволяє йому досягати високих швидкостей та виняткової маневреності [24]. Ці приклади - демонструють величезний потенціал БПЛА з трансформованим ротором у розширенні можливостей та універсальності безпілотних авіаційних систем, прокладаючи шлях для більш ефективних та адаптивних повітряних місій у

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різних галузях промисловості.

Загалом, трансформовані БПЛА мають потенціал значно покращити універсальність та ефективність БПЛА, дозволяючи їм адаптуватися до різних операційних середовищ та місій [25]. Трансформуючи свою форму або конфігурацію під час польоту, ці БПЛА можуть оптимізувати свою продуктивність для різних умов польоту та вимог місії, що робить їх цінним інструментом для широкого кола застосувань.

2.4 Висновок по розділу

У другому розділі було досліджено методи та інструменти моніторингу і керування безпілотними літальними апаратами. Розглянуто особливості людино-машинної взаємодії у системах керування БПЛА, що забезпечують ефективний контроль та підтримку прийняття рішень оператором. Проаналізовано методи обробки телеметричних даних та інформації, отриманої від сенсорів і навігаційних систем. Також досліджено використання штучного інтелекту та сучасних технологій у БПЛА для підвищення рівня автономності, точності навігації та ефективності виконання завдань. У результаті визначено сучасні підходи до побудови інтелектуальних систем керування безпілотними апаратами.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА, ІНТЕГРАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ

3.1 Проектування програмної архітектури системи керування БПЛА

Управління динамікою польоту є критично важливою галуззю аерокосмічної техніки, яка зосереджена на стійкості та управлінні літаком під час польоту [28]. Головною метою управління динамікою польоту є забезпечення стабільності, керованості та безпеки літака на всьому діапазоні його польотних характеристик. У управлінні динамікою польоту використовуються різні підходи та алгоритми для проектування систем керування, які стабілізують та керують поведінкою літака під час виконання різних польотних завдань, включаючи слідування за траєкторією, можливості трансформації, навігацію та спостереження, групові польоти [28], автономне маневрування [17], картографування та операції з розпиленням. Ці підходи та алгоритми [27 , 28], разом з їхніми архітектурними міркуваннями, використовують математичні моделі динаміки літака та теорії керування для генерації керуючих входних даних, які змінюють поведінку літака для досягнення певних цілей продуктивності [26]. Кінцева мета полягає в забезпеченні безпечних, стабільних та ефективних польотів.

Існує кілька способів класифікації методологій керування БПЛА, заснованих на таких факторах, як тип керованого БПЛА, цілі керування та - використовувані математичні методи. Ось деякі поширені класифікації в теорії керування: керування зі зворотним зв'язком проти керування з прямим зв'язком; лінійне керування проти нелінійного керування; керування в безперервному часі проти керування в дискретному часі; детерміноване керування проти стохастичного керування; керування на основі моделі проти керування без моделі, робустне керування та адаптивне керування; централізоване керування проти децентралізованого керування; оптимальне керування проти

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

субоптимального керування; та незмінне в часі керування проти керування, що змінюється в часі. Ці класифікації представляють різні підходи та алгоритми, що використовуються в управлінні динамікою польоту. Однак широко визнані чотири основні категорії: класичне керування, сучасне керування, інтелектуальне керування та адаптивне керування, кожна з яких пропонує різні методології та методи для вирішення складнощів керування динамікою польоту.

Класичний контроль

Класичне керування стосується традиційної теорії керування, що базується на математичних моделях лінійних систем. Цей підхід широко використовується в управлінні динамікою літаків і передбачає використання пропорційних, інтегральних та похідних (ПІД) алгоритмів керування. Перевага класичного керування полягає в його простоті та добре встановлених теоретичних основах [27]. Однак воно має обмеження в обробці нелінійних систем та управлінні збуреннями, які впливають на характеристики літака.

Сучасний контроль

Сучасне управління охоплює використання передової теорії управління, включаючи керування у просторі станів та оптимальне управління, для проектування систем управління, здатних обробляти нелінійності та збурення. Цей підхід широко застосовується в управлінні динамікою польоту, оскільки він забезпечує точніше управління та може керувати складними системами. Перевагою сучасного управління є його здатність обробляти нелінійні системи та невизначеності. Однак воно вимагає більшої обчислювальної потужності та складних алгоритмів, що створює проблеми для реалізації в реальному часі. Лінійний квадратичний регулятор (LQR) – це популярний алгоритм управління, який широко використовується в управлінні динамікою польоту для оптимального управління лінійними системами.

Інтелектуальне керування

Інтелектуальне керування – це розділ теорії керування, який використовує методи штучного інтелекту, такі як нейронні мережі, нечітка логіка та генетичні алгоритми, для проектування систем керування. Цей підхід

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

знаходить широке застосування в управлінні динамікою польоту, оскільки він може адаптуватися до змінних умов та забезпечувати високий рівень стійкості. Перевага інтелектуального керування полягає в його здатності обробляти складні та нелінійні системи, а також у його адаптивній природі. Однак воно вимагає значних обчислювальних ресурсів і може бути складним для аналізу та налагодження. Нейронні мережі широко використовуються в управлінні динамікою польоту, зокрема для керування та діагностики несправностей. Вони знайшли застосування в автопілотах, системах керування польотом та системах керування двигуном.

Адаптивне керування

Адаптивне керування — це клас алгоритмів керування, які можуть динамічно регулювати керування.

параметри в режимі реального часу на основі поведінки літака та умов навколишнього середовища.

Цей підхід широко використовується в управлінні динамікою польоту, оскільки він ефективно обробляє невизначеності та збурення, що робить його придатним для змінних умов експлуатації [28]. Перевага адаптивного керування полягає в його здатності враховувати невизначені системи та адаптуватися до змінних умов. Однак для вивчення поведінки системи потрібна значна кількість даних, що в певних випадках може бути складно отримати. Адаптивне керування з опорною моделлю (MRAC) — це широко використовуваний алгоритм адаптивного керування в управлінні динамікою польоту, який знаходить застосування в різних системах керування літальними апаратами, включаючи автопілоти, диспетчери польоту та системи керування польотом.

Підсумовуючи, підходи та алгоритми керування динамікою польоту відіграють вирішальну роль у забезпеченні безпечної та ефективної експлуатації літальних апаратів. Різні класи методів керування мають свої сильні та слабкі сторони, і вибір конкретного підходу залежить від конкретних вимог задачі керування. Дослідники та практики продовжують розробляти та вдосконалювати системи керування літальними апаратами, і очікується поява нових підходів та

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алгоритмів. На завершення, керування динамікою польоту є важливою галуззю аерокосмічної техніки, яка забезпечує стійкість та керованість літального апарату під час його польоту. Статичне керування стійкістю, динамічне керування стійкістю та керування маневреністю – це три основні класифікації керування динамікою польоту. Кожен клас має свої переваги та недоліки, і їх вибір залежить від конкретних конструктивних вимог літального апарату.

Розширюючи межі управління БПЛА: вивчення передових методів

Окрім широко використовуваного ПД-керування, у сфері керування БПЛА використовується кілька передових методів керування, спрямованих на підвищення продуктивності та стабільності. Ці методи особливо підходять для складних та динамічних систем БПЛА. Одним із відомих передових методів керування БПЛА є моделювальне прогнозне керування (МРС). МРС використовує математичні моделі динаміки БПЛА для прогнозування його майбутньої поведінки [29]. На основі цих прогнозів обчислюються вхідні дані керування для оптимізації заздалегідь визначеного показника продуктивності, такого як споживання енергії, стабільність або точність відстеження траєкторії. Враховуючи всю майбутню траєкторію БПЛА, МРС пропонує покращену продуктивність порівняно з традиційними методами керування. Ще одним значно передовим методом керування є адаптивне керування. Адаптивне керування коригує свої параметри в режимі реального часу, щоб адаптуватися до змін у середовищі та динаміці БПЛА. Це дозволяє системі керування постійно покращувати свою продуктивність з часом, навіть за наявності невизначеностей та збурень. Ці передові методи керування сприяють розробці більш надійних та ефективних систем керування БПЛА. Ковзний режим керування (ККК) – це ще один передовий метод керування, який широко використовується в управлінні БПЛА. ККК – це нелінійний метод керування, який забезпечує надійну роботу за наявності невизначеностей та збурень. ККК працює, підтримуючи стани БПЛА в межах бажаної робочої області, відомої як ковзний режим, що забезпечує стабільність та надійність. Нарешті, існує кілька передових методів керування, заснованих на машинному навчанні як штучному інтелекті, таких як RL та DRL,

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а також керування на основі нейронних мереж. Ці методи дозволяють БПЛА навчатися на своєму досвіді та покращувати свою ефективність керування з часом. На завершення, існує кілька передових методів керування, які використовуються в галузі керування БПЛА. Ці методи забезпечують покращену продуктивність та стабільність порівняно з традиційними методами керування, і вони добре підходять для складних та динамічних вимог систем БПЛА. Кооперативне керування - це метод, який дозволяє кільком БПЛА працювати разом для досягнення спільної мети місії. Кооперативне керування особливо корисне для БПЛА, яким необхідно виконувати складні завдання, такі як спостереження або пошуково-рятувальні роботи, що потребують координації та співпраці між кількома БПЛА.

SMC (поверхнева поверхня ковзання) – це широко використовуваний удосконалений метод керування БПЛА. SMC – це нелінійний метод керування, який забезпечує надійну роботу навіть за наявності невизначеностей та збурень. Підтримуючи стани БПЛА в межах бажаної робочої області, відомої як ковзний режим, SMC гарантує стабільність та робустність. Основна концепція SMC полягає у створенні ковзної поверхні, яка є многовидом у просторі станів.

Ковзну поверхню ретельно розроблено, щоб мати привабливі властивості, такі як збіжність за скінченний час або стійкість до змін параметрів [30]. Закон керування потім впливає на систему, щоб спрямувати її траєкторію стану до цієї ковзної поверхні та підтримувати її там. Відмінною рисою SMC є її переривчаста природа (Chattering). Закон керування складається з кількох дій керування або функцій перемикавання, які активуються на основі відносного положення стану системи відносно ковзної поверхні. Коли стан системи не знаходиться на ковзній поверхні, закон керування перемикається між різними режимами або діями керування, щоб надійно спрямувати стан до ковзної поверхні. Як тільки стан досягає ковзної поверхні, закон керування перемикається в інший режим, щоб підтримувати траєкторію системи на поверхні. Переривчаста природа SMC забезпечує стійкість до невизначеностей та збурень, оскільки дії керування швидко адаптуються на основі близькості стану до ковзної поверхні. Більше

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

того, сам режим ковзання забезпечує властиві властивості стійкості, оскільки поведінка системи на ковзній поверхні менш чутлива до змін параметрів або зовнішніх збурень. Математично, SMC спирається на теорію диференціальних включень та аналіз стійкості за Ляпуновом, щоб гарантувати збіжність системи до поверхні ковзання та подальше збереження поведінки системи на поверхні.

Загальний підхід до проектування компонентів SMC полягає у визначенні поверхні ковзання, яка відображає бажану поведінку системи. Поверхня ковзання повинна мати привабливі властивості, такі як забезпечення стабільності, збіжності або робустності. Вибір поверхні ковзання залежить від конкретної мети керування та динаміки системи. Одна з поширених поверхонь ковзання в керуванні квадрокоптером базується на похибці між бажаним станом і фактичним станом БПЛА. Поверхня ковзання розроблена для зведення динаміки похибки до нуля. Існують різні можливі поверхні ковзання, які можна використовувати на основі різних цілей БПЛА та динаміки системи. Було запропоновано кілька стратегій проектування поверхні ковзання для мінімізації або усунення режиму досягнення. Ці методи можна класифікувати на основі розмірів, лінійності, залежності від часу та характеру їхнього алгоритму руху. Вищезгадана звичайна поверхня ковзання природним чином дає пропорційно-похідну (PD) поверхню ковзання. Для отримання PID-структур також можна включити інтегральну дію. Включення інтегрального члена зазвичай виконується разом з підходом SMC пограничного шару. Включивши інтегральний член, можна усунути похибку стаціонарного стану, що виникає внаслідок граничного шару [31]. Провів велику роботу з класифікації поверхні ковзання на різні категорії, включаючи лінійну постійну поверхню ковзання, лінійну дискретно рухому поверхню ковзання, лінійну безперервно рухому поверхню ковзання, постійну нелінійну поверхню ковзання та нелінійну змінну в часі поверхню ковзання. Всі ці поверхні ковзання призначені для покращення продуктивності контролера шляхом мінімізації або усунення часу, необхідного для досягнення фази ковзання. Другим кроком у проектуванні SMC є визначення еквівалентного закону керування та закону перемикавання. Після визначення

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхні ковзання виводиться еквівалентний закон керування для спрямування динаміки системи на поверхню ковзання та її підтримки там. Еквівалентний закон керування зазвичай отримують шляхом аналізу динамічного рівняння системи, яке призначене для забезпечення бажаної поведінки системи та досягнення цілей керування. Воно включає визначення керуючого сигналу, який змусить стан системи слідувати за поверхнею ковзання та стабілізувати систему. Закон керування повинен бути розроблений для протидії впливу невизначеностей, збурень та нелінійностей у системі. Закон перемикання є вирішальним компонентом, який забезпечує збереження станів системи на поверхні ковзання. Він відіграє ключову роль у відхиленні збурень, невизначеностей та інших зовнішніх факторів, які можуть впливати на продуктивність системи. Використовуючи переривчастий керуючий сигнал, зокрема, керуючий сигнал із заданим значенням, цей сигнал змушує систему «ковзати» вздовж ділянки своєї типової поведінки. Існують різні типи законів досягнення для SMC, включаючи закони досягнення з перемиканням та без перемикання [32]. Крім того, було введено новий закон досягнення без перемикання, який демонструє покращену стійкість системи без посилення величини критичних сигналів у системі. Закони досягнення без перемикання усувають необхідність перемикання через гіперплощину ковзання на кожному наступному кроці. Крім того, було введено новий закон досягнення без перемикання, який демонструє покращену стійкість системи без посилення величини критичних сигналів у системі. Закони досягнення без перемикання усувають необхідність перемикання через гіперплощину ковзання на кожному наступному кроці.

Методи машинного навчання (ML), включаючи RL, DRL та керування на основі нейронних мереж, дозволяють БПЛА навчатися на своєму досвіді та постійно покращувати свої показники керування з часом. БПЛА отримали велику користь від застосування ML, що дозволило їм ефективно виконувати поставлені завдання. Дослідники досліджували потенціал БПЛА в різних сферах, таких як інспекція, доставка та спостереження. Методи ML були використані для

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення стратегій керування, включаючи адаптивне керування в невизначених умовах, планування шляху в реальному часі та розпізнавання об'єктів. Цікавим підходом до керування БПЛА за допомогою ML є DRL. Цей метод дозволяє БПЛА автономно знаходити оптимальні закони керування, взаємодіючи з системою та обробляючи складну нелінійну динаміку. Примітно, що DRL продемонстрував успіх у керуванні орієнтацією БПЛА з фіксованим крилом, використовуючи оригінальну нелінійну динаміку, маючи лише три хвилини польотних даних. Інтеграція машинного навчання (ML) не лише розширила можливості БПЛА, але й зменшила труднощі, відкривши двері в різні сектори. Ця комбінація дала швидкі та надійні результати [33]. У сфері проектування контролерів польоту БПЛА традиційно домінували методи керування на основі моделей (МВС). Однак вони значною мірою залежать від точних математичних моделей реальної установки та стикаються з проблемами складності. Штучні нейронні мережі (ANN) пропонують перспективне рішення для вирішення цих проблем завдяки своїм унікальним особливостям та перевагам в ідентифікації систем та проектуванні контролерів. У комплексному огляді розглядається комбінація МВС та ANN для керування польотом БПЛА, особливо в управлінні на низьких рівнях. Метою є створення основи та сприяння ефективним конструкціям контролерів з гарантіями продуктивності. Нечітка логіка була використана для проектування автономних систем керування польотом БПЛА. Наприклад, дослідження, зосереджене на динаміці польоту БПЛА, розробило поздовжні та поперечні контролери на основі нечіткої логіки. Незважаючи на відсутність використання методів оптимізації або знань динамічних моделей, контролер з нечіткою логікою продемонстрував задовільну продуктивність. Інший приклад включає автономний контролер польоту для БПЛА на основі ANFIS, який використовує три модулі нечіткої логіки для керування положенням БПЛА у тривимірному просторі, включаючи висоту та довготу-широту. Таким чином, галузь керування БПЛА охоплює кілька передових методів, які пропонують покращену продуктивність та стабільність

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порівняно з традиційними підходами до керування. Ці методи добре підходять для задоволення складних та динамічних вимог систем БПЛА.

Кооперативне керування – це техніка, яка сприяє співпраці кількох БПЛА для досягнення спільної мети місії. Особливо для таких завдань, як спостереження або пошуково-рятувальні операції, де координація та співпраця між кількома БПЛА є важливими, кооперативне керування виявляється дуже корисним. Кооперативне керування БПЛА передбачає ефективну координацію та співпрацю між кількома дронами для досягнення спільних цілей. Рої БПЛА мають переваги з точки зору підвищення ефективності, гнучкості, точності, стійкості та надійності. Тим не менш, інтеграція зовнішніх комунікацій створює можливість виникнення додаткових несправностей, збоїв, невизначеностей та кібератак, що потенційно може призвести до поширення помилок [34]. З метою забезпечення безпеки експлуатації в галузі кооперативного керування були розроблені методи виявлення та діагностики несправностей (FDD) та відмовостійкого керування (FTC). Ці методи призначені для виявлення та усунення несправностей, які можуть виникнути в окремих компонентах БПЛА. Блок FDD відповідає за діагностику несправностей, тоді як блок FTC пропонує відповідні компенсаційні заходи. Кооперативні БПЛА знаходять широке застосування в різних галузях, таких як пошуково-рятувальні операції, патрулювання кордонів, картографічні завдання, місії спостереження та військові операції. Ці завдання добре підходять для автономних транспортних засобів через їх повторюваний або небезпечний характер. Використання кількох БПЛА суттєво підвищує ефективність виконання. У сфері кооперативного управління останні досягнення включають впровадження розподіленого консенсусного алгоритму для багатоагентних систем (MAS). Цей алгоритм забезпечує безперебійну передачу вхідних сигналів до каналів управління, ефективно пом'якшуючи небажаний ефект вібрації, пов'язаний зі звичайними протоколами управління. Ще однією інноваційною концепцією є кооперативне виявлення та діагностика несправностей (CFDD) та відмовостійке кооперативне управління (FTCC), які пом'якшують негативний вплив несправностей

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компонентів та зв'язку, які можуть виникнути під час польотів у формації або рою. В рамках архітектури кооперативного управління дрони збирають сенсорні дані, спілкуються та обмінюються інформацією. Завдання призначаються на основі вимог місії, і генеруються оптимальні шляхи. Алгоритми керування забезпечують точне відстеження траєкторії, а механізми запобігання зіткненням гарантують безпечну експлуатацію. Безперервний зворотний зв'язок та адаптація підтримують точне відстеження траєкторії. Завдяки впровадженню цих кроків та удосконалень, кооперативне керування дозволяє дронам ефективно працювати разом, виконувати складні завдання та досягати синхронізованого слідування траєкторії. Це підвищує ефективність та результативність у різних застосуваннях, таких як повітряні формування, спостереження та скоординовані картографічні місії. Архітектура кооперативного керування для БПЛА починається зі збору сенсорних даних та зв'язку один з одним для обміну інформацією [35]. Завдання та ролі призначаються на основі вимог місії, враховуючи можливості та доступність ресурсів. Оптимальні шляхи та траєкторії генеруються для виконання поставлених завдань, враховуючи цілі місії та обмеження навколишнього середовища. Рівень керування перетворює команди високого рівня та заплановані шляхи на дії низького рівня, забезпечуючи стабільність, керування рухом та відстеження траєкторії. Рівень управління місією контролює загальну місію, адаптуючи плани та розподіляючи ресурси за потреби на основі зворотного зв'язку від БПЛА в режимі реального часу. Такий інтегрований підхід дозволяє ефективно розподіляти завдання, точно контролювати та адаптивно керувати місіями, сприяючи ефективній співпраці між БПЛА для досягнення складних цілей.

Відмовостійке керування (FTC) – це методологія, що використовується для підтримки прийнятної продуктивності та забезпечення безпеки системи навіть у разі виникнення несправностей або збоїв в її апаратних або програмних компонентах. Такі несправності або збої можуть виникати з різних причин, включаючи несправності датчиків, несправності виконавчих механізмів, втрати зв'язку або помилки програмного забезпечення. Метою відмовостійкого

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування є виявлення несправностей або збоїв та пом'якшення їх наслідків шляхом переналаштування системи керування або адаптації закону керування. Цього можна досягти за допомогою використання методів резервування, виявлення та ізоляції несправностей (FDI), а також стратегій усунення несправностей. Резервування передбачає наявність кількох копій критичних апаратних або програмних компонентів, які можуть взяти на себе керування у разі відмови або збою. Наприклад, БПЛА може мати резервні датчики або виконавчі механізми, які можна використовувати, якщо основні вийдуть з ладу. Методи FDI використовують дані датчиків для виявлення та ізоляції несправностей або збоїв в апаратному або програмному забезпеченні БПЛА. FDI може бути досягнуто за допомогою різних методів, включаючи підходи на основі спостерігачів, статистичні методи або аналітичну резервування. Стратегії усунення несправностей адаптують закон керування або переналаштовують систему керування для підтримки стабільності та продуктивності БПЛА за наявності несправностей або збоїв. Ці стратегії можуть включати перемикання на резервний закон керування, регулювання коефіцієнтів посилення керування або використання адаптивних методів керування [36]. Загалом, відмовостійке керування відіграє вирішальну роль у забезпеченні безпечної та надійної роботи БПЛА навіть за наявності несправностей або збоїв. Воно дозволяє БПЛА виявляти та пом'якшувати наслідки несправностей або збоїв, що дозволяє їм ефективно продовжувати роботу та досягати своїх цілей. Нещодавні досягнення в галузі виявлення несправностей (FTC) для БПЛА стали предметом кількох досліджень. Робота надає вичерпний огляд нещодавніх досліджень з діагностики несправностей, FTC та виявлення аномалій, спеціально розроблених для БПЛА. Крім того, окремий огляд зосереджений на темі відмовостійкого кооперативного керування, зокрема, розглядаючи керування кількома БПЛА відмовостійким способом. Це дослідження заглиблюється в останні розробки в відмовостійкому кооперативному управлінні та пропонує систематичний аналіз методів FTCS, що застосовуються до сценаріїв з кількома БПЛА. У дослідженні спочатку підсумовується та аналізується формування стратегій керування для

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безвідмовних умов польоту кількох БПЛА. Крім того, в іншому дослідженні для системи орієнтації квадрокоптера БПЛА пропонується адаптивний відмовостійкий метод керування, інтегрований з технологією швидкого термінального ковзного режиму керування (FTSMC) та нейронною мережею.

Використання нейронної мережі дозволяє апроксимувати невизначені члени в системі, тим самим підвищуючи відмовостійкі можливості.

Контроль заданої продуктивності (КПП) – це методологія керування, спеціально розроблена для виконання заданих критеріїв продуктивності. У КПП задана продуктивність стосується забезпечення

того, щоб похибка стеження збігалася до заздалегідь визначеного малого набору залишків, задовольняючи при цьому заздалегідь визначену швидкість збіжності та обмежуючи максимальне перевищення достатньо малою константою. Отже, бажані показники перехідної продуктивності, такі як час перевищення та збіжності, успішно досягаються. У цьому уривку підкреслюється важливість досягнення хорошої перехідної продуктивності в системах керування літальними апаратами, що охоплюють традиційні літаки, гіперзвукові літальні апарати та безпілотні літальні апарати (БПЛА). У ньому обговорюється кілька досліджень та методологій, які використовують КПП для досягнення цієї мети. Дослідження зосереджується на традиційному підході КПП для розробки інтегрованого методу наведення та керування перехоплювачами, що забезпечує відмінну перехідну продуктивність під час перехоплення цілі. У випадку гіперзвукових літальних апаратів дослідження показали, що нормальна КПП гарантує задовільну перехідну продуктивність [37]. Однак задоволення суворої початкової умови для похибки стеження створює труднощі. Щоб вирішити цю проблему, було запропоновано модифіковані версії РРС як неафінні моделі для зменшення залежності від початкової похибки. Тим не менш, ці методи можуть призвести до значного перевищення через вибір початкового значення функції продуктивності. Щоб зменшити цю проблему, для розробки лаконічного нейронного контролера відстеження для гіперзвукових літальних апаратів застосовується нещодавно

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розроблена функція продуктивності. Результати моделювання демонструють мале або нульове перевищення у відстеженні швидкості та висоти. БПЛА, які мають значний потенціал у військових та цивільних застосуваннях, отримують велику користь від хорошої перехідної продуктивності для ефективного виконання завдань. Було запропоновано численні методології керування відстеженням, що використовують РРС. У роботі представлено контролер відстеження на основі нечіткого зворотного кроку із заданою продуктивністю для одного БПЛА. Крім того, РРС застосовується до керування взводом, керування командою-слідувачем, а також до децентралізованих, скінченних за часом, адаптивних відмовостійких, синхронізованих БПЛА та квадаторних БПЛА.

Таблиця 3.1

Підсумок та порівняння переваг і недоліків: методи управління в галузі
безпілотних літальних апаратів.

Метод керування		Переваги	Недоліки
PID (ПД-регулятор)		Проста реалізація; мінімальне споживання пам'яті; швидкий відгук та зручність для користувача.	Тривалий процес проведення експериментів; ризик надмірного посилення та «перельоту» (overshoot) при налаштуванні.
SMC (Керування в ковзному режимі)		Висока стійкість до змін параметрів та збурень; не потребує лінеаризації динаміки; ефективний за часом.	Сильний ефект «брязкання» (chattering) під час перемикавання; складний процес проєктування; залежність від точності вибору поверхні ковзання.
LQR (Лінійно-квадратичний регулятор)		Забезпечує робастну стабільність при мінімізації енерговитрат; обчислювальна ефективність; можливість покращення через фільтр Калмана.	Необхідний повний доступ до станів системи (що не завжди можливо); немає гарантії швидкості відгуку; не підходить для систем з мінімальною статичною похибкою.
Gain Scheduling (Планування коефіцієнтів)		Швидка реакція на динамічні зміни умов роботи; добре інтегрується зі складними нелінійними задачами.	Неефективний за часом; залежить від проведення великої кількості симуляцій; відсутність гарантованих результатів продуктивності.
Backstepping (Зворотний крок)		Робастність перед постійними зовнішніми збуреннями; робота з усіма станами системи та нелінійними моделями.	Низька часова ефективність; чутливість до варіацій параметрів; складна реалізація.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження таблиці 3.1

H-Infinity (Н-нескінченність)	Здатність працювати в умовах невизначеностей; робастна продуктивність та стабільність.	Використання складних математичних алгоритмів; потребує досить точної моделі об'єкта керування; важка реалізація.
Adaptive Control (Адаптивне керування)	Обробка систем з непередбачуваними змінами параметрів та збуреннями; швидка реакція на зміни.	Необхідна точна модель системи; часомістке впровадження та значний обсяг проєктувальних робіт.
AI: Fuzzy Logic & Neural Networks	Дії базуються на наданих правилах або навчанні; стійкість до невідомих збурень; адаптивність параметрів.	Неможливо гарантувати стабільність; потребує великої обчислювальної потужності та постійного налаштування; ризик невдачі офлайн-навчання при невизначеностях.

У дослідженні на основі зворотного кроку в результаті моделювання підтвердили їхню чудову продуктивність як у перехідних, так і в стаціонарних режимах. Підсумовуючи, цей уривок підкреслює застосування РРС для досягнення бажаної перехідної продуктивності на різних літальних апаратах, включаючи літаки, гіперзвукові літальні апарати та БПЛА. Дослідження, на які посилаються, надають докази ефективності методологій РРС.

Ретельно дослідивши різні літературні джерела, ми склали таблицю 3.1, де окреслено переваги та недоліки кожного контролера відповідно до думок різних авторів.

Міркування щодо вибору відповідного алгоритму керування

Вибір правильного алгоритму керування для БПЛА є вирішальним рішенням, яке залежить від різних факторів, включаючи тип БПЛА, цілі його місії, умови навколишнього середовища та доступні апаратні та програмні ресурси. Під час вибору або розробки алгоритму керування слід враховувати кілька міркувань. По-перше, важливо визначити вимоги до БПЛА. Розуміння вимог до продуктивності БПЛА, таких як дальність польоту, вантажопідйомність та умови навколишнього середовища, має вирішальне значення для визначення найбільш підходящого алгоритму керування. Далі оцініть різні алгоритми керування, доступні для БПЛА, включаючи класичний PID, PID2, LQR,

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування ковзним режимом та адаптивний контролер з опорною моделлю. Оцініть сильні та слабкі сторони кожного алгоритму та подумайте, наскільки добре вони відповідають вимогам БПЛА. Врахуйте складність реалізації обраного алгоритму керування. Деякі алгоритми можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів або спеціалізованого обладнання, такого як алгоритми на основі машинного навчання або кооперативне прийняття рішень та керування. Виберіть алгоритм, який можна легко реалізувати на апаратній платформі БПЛА, враховуючи доступні обчислювальні ресурси. Після вибору алгоритму керування оптимізуйте його продуктивність, налаштувавши його параметри керування [38]. Льотні випробування можуть проводитися для збору даних про поведінку БПЛА під час польоту та коригування параметрів алгоритму керування для оптимальної продуктивності. Ось деякі ключові міркування щодо вибору або розробки алгоритму керування для БПЛА:

1. Стабільність та керування: Алгоритм повинен забезпечувати стабільність та лабільність керування БПЛА навіть у турбулентних або складних умовах.

2. Продуктивність: Алгоритм повинен дозволити БПЛА досягти своїх цілей щодо продуктивності, таких як швидкість, висота та маневреність, одночасно мінімізуючи споживання енергії та оптимізуючи тривалість місії.

3. Чутливість до навколишнього середовища: Алгоритм повинен враховувати фактори навколишнього середовища, які можуть впливати на роботу БПЛА, такі як вітер, температура та вологість.

4. Швидкість реагування: Алгоритм повинен бути здатним швидко реагувати на зміни в цілях місії БПЛА або неочікувані події, такі як перешкоди чи інші літальні апарати.

5. Обчислювальні вимоги: Алгоритм повинен бути обчислювально ефективним та здійсненним для наявного вбудованого апаратного та програмного забезпечення для обробки.

6. Надійність: Алгоритм повинен бути стійким до невизначеностей, таких як шум датчика або помилки в кінематичній моделі БПЛА.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Безпека: Алгоритм повинен забезпечувати безпечну роботу БПЛА та уникати зіткнень з іншими об'єктами, людьми або тваринами.

8. Відповідність нормативним вимогам: Алгоритм повинен відповідати місцевим нормам та інструкціям щодо експлуатації БПЛА, таким як обмеження висоти польоту та обмеження траєкторії польоту.

9. Взаємодія з людиною: Алгоритм повинен дозволяти операторам взаємодіяти з БПЛА та надавати вхідні дані або команди, якщо це необхідно.

Загалом, метод вибору правильного алгоритму керування для БПЛА включає ретельний розгляд вимог до БПЛА, оцінку різних алгоритмів керування, моделювання та тестування, складність реалізації та оптимізацію.

3.2 Апаратно-програмна інтеграція та особливості реалізації системи

Архітектура апаратного забезпечення безпілотних літальних апаратів

Архітектура апаратного забезпечення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) охоплює кілька критично важливих компонентів, таких як бортовий комп'ютер та контролер, датчики, виконавчі механізми, акумулятор, комунікаційні інтерфейси, корисне навантаження та структурні компоненти. Бортний комп'ютер та контролер керують траєкторією польоту та стабілізацією БПЛА. Датчики забезпечують важливі дані про навігацію, висоту та орієнтацію, тоді як виконавчі механізми керують рухом БПЛА. Акумулятор, обраний відповідно до вимог застосування, забезпечує живлення БПЛА. Комунікаційні інтерфейси дозволяють дистанційно керувати та передавати дані, тоді як корисне навантаження може включати камери, датчики та інше обладнання, специфічне для застосування. Структурні компоненти, включаючи раму та кронштейни, забезпечують підтримку та стабільність БПЛА, дозволяючи ефективну роботу в різних застосуваннях. Ця апаратна архітектура суттєво впливає на можливості та продуктивність БПЛА в різних контекстах. Численні дослідження розглядали загальну апаратну архітектуру. У літературі було запропоновано багаторівневу архітектуру для БПЛА. Характеристики сучасних БПЛА були детально

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обговорені. Аспекти мініатюрних БПЛА розглядаються, а необхідні програмні компоненти для реалізації керування БПЛА в реальному часі. Незалежно від масштабу, БПЛА зазвичай містять ті самі компоненти з доповненнями та модифікаціями відповідно до застосування.

Бортовий комп'ютер та контролер

Бортовий комп'ютер служить основним процесором, який керує навігацією та польотом БПЛА. Він об'єднує дані з усіх датчиків та виконавчих механізмів для керування траєкторією польоту та стабільністю БПЛА. Для БПЛА середнього або великого масштабу цей блок, як правило, є більш досконалим та потужним, враховуючи підвищену складність системи. Велика кількість літератури містить вичерпні огляди та дослідження щодо контролерів польоту та комп'ютерів. Інші роботи заглиблюються в розробку та реалізацію контролера польоту БПЛА.

Датчики

Комплект датчиків БПЛА зазвичай охоплює низку пристроїв, таких як акселерометри, гіроскопи, магнітометри, барометри, GPS та камери. Ці датчики надають важливу інформацію щодо орієнтації, положення та навколишнього середовища БПЛА. БПЛА середнього або великого масштабу можуть додатково включати LIDAR, радар та інші спеціалізовані датчики для таких застосувань, як навігація та картографування. Коротке порівняння платформ дистанційного зондування. Для сільськогосподарського застосування датчики та їх розгортання обговорюються, а їх використання в будівництві та цивільному секторі детально описано [39]. Дослідження електромагнітних перешкод на датчиках БПЛА розглядається, а застосування різних датчиків у гірничодобувних районах обговорюється. У роботі розглядається багатосенсорне об'єднання даних з використанням глибокого навчання (DL) для цілей безпеки та спостереження, а в роботі досліджується дистанційне зондування для моніторингу здоров'я лісів .

Приводи

Це включає двигуни, сервоприводи та електронні регулятори швидкості (ESC), які керують рухом та стабільністю БПЛА. БПЛА середнього або великого

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розміру, як правило, більші та потужніші, щоб справлятися зі збільшеною вагою та розміром БПЛА. Електричну рушійну систему БПЛА було розглянуто. Застосування розробки приводу було проаналізовано. Розробку інших плазмових приводів рушійної системи було детально розглянуто.

Акумулятор

Це джерело живлення, яке забезпечує енергією компоненти БПЛА. БПЛА середнього або великого масштабу зазвичай потребує більшого акумулятора, щоб забезпечити достатньо енергії для живлення своїх компонентів, причому багато робіт зосереджені на системах живлення БПЛА та управлінні їхньою енергією. Хоча деякі зосереджені на архітектурах джерел живлення БПЛА, їх методи заряджання добре обговорюються, тоді як бездротова зарядка БПЛА розглядається. Крім того, представлені ключові технології паливних елементів БПЛА. Інтелектуальне управління енергією та гібридне джерело живлення для БПЛА розглядаються.

Комунікаційні інтерфейси

Це включає радіостанції та інші комунікаційні пристрої, які дозволяють БПЛА передавати дані та отримувати дані від наземних станцій, інших БПЛА або інших пристроїв. БПЛА середнього або великого масштабу, як правило, є більш складними та здатні передавати й отримувати більші обсяги даних на більші відстані. Дослідження характеристик проблем комунікаційної мережі БПЛА, проблем проектування та застосувань розглянуто в [29], тоді як використовуваний процес комунікації для БПЛА обговорюється. Огляд мережевих та комунікаційних технологій добре представлений. Системи п'ятого покоління (5G) та супутниковий зв'язок для навігації та спостереження БПЛА представлені. Крім того, було проведено поглиблений аналіз архітектур ройового зв'язку. Крім того, описано комунікаційні мережі Інтернету речей на основі БПЛА, а застосування Інтернету речей для сталого розумного сільського господарства досліджується.

Корисне навантаження

Це обладнання, яке БПЛА несе для виконання своєї конкретної місії, таке

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

як камери, датчики або інше спеціалізоване обладнання. БПЛА середнього або великого масштабу зазвичай є більш складним та спеціалізованим і може включати спеціалізовані датчики, камери або інше обладнання для підтримки своєї місії. Можливості БПЛА доставки корисного навантаження та скидання корисного навантаження досліджуються відповідно.

Структурні компоненти

До них належать рама, важелі та інші компоненти, що забезпечують фізичну структуру БПЛА та підтримують інші компоненти. Структурні компоненти середнього або великого БПЛА зазвичай більші, міцніші та складніші, щоб підтримувати його розмір та вагу. Концепція та початковий дизайн БПЛА були розглянуто [40]. Механічне напруження рами БПЛА було проаналізовано, тоді як було розглянуто методи скінченних елементів для структурного аналізу БПЛА. Структурний аналіз та оптимізація крила БПЛА були досліджені, а структурне проектування та оптимізація маломасштабних БПЛА були детально розглянуто.

Це загальна архітектура апаратного забезпечення для БПЛА. Залежно від конкретного БПЛА та його призначення, архітектура може відрізнятися, а також можуть бути додані додаткові компоненти для задоволення конкретних вимог. У деяких випадках БПЛА можуть використовувати двигуни внутрішнього згоряння для вироблення електроенергії, яка може бути використана для живлення електродвигунів. Однак це трапляється відносно рідко, оскільки електродвигуни зазвичай є більш ефективними, надійними та екологічними, ніж двигуни внутрішнього згоряння.

Архітектура програмного забезпечення для БПЛА

Дозволяє БПЛА працювати ефективно та результативно. Архітектура БПЛА, як автономної системи, зазвичай складається з кількох рівнів, включаючи рівень прошивки, рівень операційної системи, рівень проміжного програмного забезпечення та рівень додатків. Рівень прошивки містить код, який керує апаратними компонентами БПЛА, такими як контролер польоту та датчики. Рівень операційної системи забезпечує необхідний інтерфейс між прошивкою та

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

програмними додатками вищого рівня. Рівень проміжного програмного забезпечення містить програмні компоненти, які забезпечують зв'язок та обмін даними між різними частинами системи. Цей рівень включає протоколи та програмні бібліотеки для передачі, обробки та зберігання даних. Нарешті, рівень додатків включає програмне забезпечення, яке працює поверх інших рівнів та забезпечує необхідну функціональність для цільового застосування БПЛА. Цей рівень включає програмне забезпечення для планування польоту, навігації, аналізу даних та керування корисним навантаженням.

Загалом, архітектура програмного забезпечення для БПЛА є складною та високоінтегрованою системою, яка повинна бути ретельно розроблена для забезпечення надійної та ефективної роботи в різних застосуваннях. Передові методи програмного забезпечення, такі як машинне навчання та штучний інтелект, також стають дедалі важливішими в архітектурах програмного забезпечення БПЛА для покращення автономності та можливостей прийняття рішень.

Застосування БПЛА та основні проблеми

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) мають численні та різноманітні комерційні, військові та наукові застосування. Застосування БПЛА обговорювалося та класифікувалося в численних видах літератури. Деякі з найпоширеніших застосувань БПЛА включають аерофотозйомку та відеозйомку. БПЛА можуть захоплювати високоякісні зображення та відеоматеріали з повітря, що робить їх ідеальними для таких застосувань, як кіновиробництво, нерухомість та туризм. У сільському господарстві БПЛА можуть використовуватися для моніторингу посівів, виявлення хвороб сільськогосподарських культур, а також оптимізації зрошення та удобрення, що призводить до більш ефективних та стійких методів ведення сільського господарства. БПЛА також можуть бути оснащені спеціалізованими датчиками та камерами для допомоги в пошуково-рятувальних операціях, особливо у віддалених або важкодоступних районах. У військових та правоохоронних органах БПЛА можуть використовуватися для розвідки, спостереження та

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виявлення цілей у військових та правоохоронних цілях. БПЛА знаходять застосування в інспекції інфраструктури, допомагаючи в ефективній та економічно вигідній інспекції та моніторингу таких споруд, трубопроводи та лінії електропередач. Вони також значною мірою сприяють зусиллям зі збереження навколишнього середовища, контролюючи такі параметри, як якість повітря та води, а також популяції дикої природи. Крім того, БПЛА служать важливими інструментами в наукових дослідженнях, сприяючи моніторингу навколишнього середовища, дослідженням атмосфери та відстеженню дикої природи. Вони значно покращили наше розуміння кріосферних особливостей, як на поверхні, так і під поверхнею. БПЛА також революціонізували дослідження фауни, забезпечивши неінвазивні методи точного підрахунку та морфометричного аналізу різних видів тварин. Атмосферні дослідження, що проводяться БПЛА, пропонують швидкий та універсальний збір даних, включаючи збір зразків аерозолів. Розробка та розробка спеціалізованих платформ, адаптованих до складного антарктичного середовища, відіграли важливу роль в успішному розгортанні цих застосувань [19]. Споживчі БПЛА призначені для особистого використання, такі як дрони для любителів, дрони для аерофотозйомки та гоночні дрони. Загалом, застосування БПЛА продовжує розширюватися та розвиватися з появою нових технологій та можливостей, що забезпечує значні можливості для інновацій та розвитку в широкому спектрі галузей. Через збільшення застосування БПЛА, певні способи їх використання викликають спільні занепокоєння та проблеми в різних галузях. До них належать проблеми конфіденційності, дотримання нормативних вимог, технічні проблеми, вимоги до спеціалізованого обладнання та потенційні ризики для безпеки. Проблеми конфіденційності виникають через зйомку зображень та відео без згоди, тоді як дотримання нормативних вимог та технічні проблеми пов'язані з експлуатацією БПЛА в спеціалізованих середовищах. Потреба в спеціалізованих датчиках та програмному забезпеченні, поряд з потенційними ризиками для безпеки від аварій або катастроф, також є спільними проблемами використання БПЛА в різних галузях.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ключові тенденції: проекти програмного та апаратного забезпечення для БПЛА з відкритим кодом

Існує багато проектів з відкритим кодом, пов'язаних із застосуванням передових методів керування в БПЛА. Нижче наведено кілька прикладів.

Автопілот PX4

Це платформа керування польотом з відкритим кодом, що використовується для автономної навігації та керування, яка підтримує широкий спектр БПЛА. Платформа надає розширені алгоритми керування, такі як прогнозне керування моделлю, адаптивне керування та R, які можна використовувати для покращення стабільності та продуктивності БПЛА. Це забезпечує гнучку та модульну платформу для розробки автономних систем польоту, включаючи розширені алгоритми навігації та керування. Програмне забезпечення сумісне з низкою апаратних платформ та підтримує різноманітні протоколи зв'язку.

ArduPilot

Це платформа автопілота з відкритим кодом, що використовується для автономної навігації та керування, яка підтримує різноманітні БПЛА, включаючи літаки з фіксованим крилом, багатороторні апарати та марсоходи. Платформа надає передові алгоритми керування, такі як адаптивне керування та штучний інтелект, які можна використовувати для покращення стабільності та продуктивності БПЛА. Вона надає низку функцій для автономної навігації та керування, включаючи навігацію за точками GPS, автоматизований зліт і посадку, а також планування місій. Програмне забезпечення сумісне з широким спектром апаратних платформ і активно підтримується великою спільнотою розробників.

TensorFlow для БПЛА

Є бібліотекою програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом для програм машинного навчання (ML) та штучного інтелекту (AI). У контексті БПЛА TensorFlow може використовуватися для різноманітних застосувань, таких як виявлення та розпізнавання об'єктів, планування шляху та, а також

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

об'єднання даних датчиків. Наприклад, TensorFlow може використовуватися для навчання глибоких нейронних мереж розпізнавати об'єкти на зображеннях або відео, знятих БПЛА, що може бути корисним для таких застосувань, як пошуково-рятувальні операції або спостереження. TensorFlow також може використовуватися для планування шляху та навігації, навчаючи моделі машинного навчання прогнозувати оптимальну траєкторію для БПЛА на основі обмежень навколишнього середовища та місії. Крім того, TensorFlow може використовуватися для об'єднання даних датчиків, інтегруючи дані з кількох датчиків на БПЛА для створення більш точної та повної картини навколишнього середовища.

БПЛА napapaці

Це проєкт з відкритим кодом, який забезпечує повну систему автопілотування для БПЛА, включаючи передові алгоритми керування та інструменти для планування польотів та виконання місій.

Наземний контроль

QGroundControl, Mission Planner, APM Planner 2 та UgCS – це наземні станції керування з відкритим кодом, які забезпечують графічний інтерфейс користувача для керування БПЛА. Ці платформи забезпечують розширені алгоритми керування, такі як адаптивне керування, які можна використовувати для покращення стабільності та продуктивності БПЛА.

AirSim

Aerial Informatics and Robotics Simulation – це симулятор БПЛА з відкритим кодом, розроблений Microsoft. Він забезпечує реалістичне середовище моделювання для тестування та розробки алгоритмів керування БПЛА, включаючи передове фізичне моделювання БПЛА та його середовища. Програмне забезпечення розроблено гнучким та налаштованим, що дозволяє користувачам експериментувати з різними стратегіями керування та конфігураціями датчиків. Платформа надає передові алгоритми керування, такі як R, які можна використовувати для покращення стабільності та продуктивності БПЛА.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

БПЛА JdeRobot

Це набір інструментів з відкритим кодом для розробки робототехніки, включаючи БПЛА, який надає комплексний набір інструментів та алгоритмів для керування БПЛА. Платформа надає розширені алгоритми керування, такі як прогнозне керування моделями та R, які можна використовувати для покращення стабільності та продуктивності БПЛА.

DroneKit та DroneKit-Python

DroneKit та DroneKit-Python - це фреймворки SDK з відкритим кодом для створення додатків, що працюють на програмному забезпеченні для автопілотів, такому як ArduPilot та PX4. DroneKit надає набір високорівневих API, які дозволяють розробникам легко взаємодіяти з системою автопілотування БПЛА, отримувати доступ до даних телеметрії та надсилати команди БПЛА, тоді як DroneKit-Python — це бібліотека Python, яка розширює можливості DroneKit та забезпечує простий та зручний інтерфейс для розробки додатків для БПЛА на основі Python. Це включає низку високорівневих API для керування та моніторингу БПЛА, а також підтримку доступу до даних датчиків, керування виконавчими механізмами та реалізації користувацьких моделей поведінки. Переваги DroneKit включають його здатність підтримувати широкий спектр платформ розробки, включаючи Linux, Windows та Mac OS X, та його гнучкість у підтримці кількох платформ програмного забезпечення для автопілотів, включаючи ArduPilot та PX4. Це дозволяє розробникам створювати додатки, які можуть працювати з широким спектром апаратних та програмних конфігурацій БПЛА. Більше того, DroneKit надає низку API для керування та моніторингу БПЛА, включаючи планування місій, телеметрію та керування транспортними засобами.

MAVLink

MAVLink - це легкий комунікаційний протокол з відкритим кодом, який широко використовується в індустрії БПЛА для полегшення зв'язку між різними компонентами системи БПЛА. Він розроблений як платформонезалежний і може бути реалізований на широкому спектрі пристроїв, включаючи наземні станції

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування, бортові контролери польоту та інші периферійні пристрої. MAVLink забезпечує гнучку та розширювану систему обміну повідомленнями, яка дозволяє різним компонентам системи БПЛА обмінюватися інформацією, такою як стан польоту, дані датчиків та команди керування. Це дозволяє різним компонентам системи БПЛА працювати разом скоординовано та ефективно. Однією з ключових переваг використання MAVLink є його здатність підтримувати широкий спектр апаратних та програмних платформ. Це дозволяє розробникам та виробникам БПЛА використовувати існуючі програмні та апаратні компоненти та створювати систему, яка відповідає їхнім конкретним потребам.

UDP та TCP. Ця гнучкість дозволяє використовувати MAVLink у широкому спектрі застосувань, включаючи наземні станції керування, автономні транспортні засоби та системи дистанційного зондування.

ROS для БПЛА

Операційна система роботів (ROS) – це програмний фреймворк з відкритим вихідним кодом для робототехніки, який пропонує розробникам бібліотеки та інструменти для створення та управління роботизованими системами. У сфері БПЛА ROS може бути використана для створення автономних дронів та інших повітряних роботів. ROS знаходить застосування в різних областях БПЛА, включаючи навігацію за допомогою SLAM [35] та алгоритми планування шляху, щоб допомогти БПЛА в навігації в складних середовищах та уникненні перешкод. Вона також полегшує виявлення об'єктів, спостереження та картографування. Інтегруючи такі датчики, як камери, LIDAR та GPS, ROS дозволяє БПЛА сприймати своє оточення та приймати інтелектуальні рішення на основі даних датчиків. Крім того, ROS забезпечує фреймворк керування з інтерфейсами для керування двигуном, зв'язку з бортовими датчиками та обробки даних датчиків для прийняття рішень. Перед розгортанням алгоритмів та стратегій керування в реальному світі ROS пропонує потужне середовище моделювання для тестування функціональності БПЛА. Однією з суттєвих переваг використання ROS у сфері БПЛА є велика та активна

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спільнота, яка надає численні ресурси, включаючи бібліотеки, навчальні посібники та форуми, для підтримки розробників у створенні та розгортанні БПЛА з використанням ROS. Загалом, ROS у сфері БПЛА надає потужний набір інструментів для розробки автономних дронів та інших повітряних роботів, що забезпечує розширені можливості навігації, сприйняття, керування та ройового контролера.

Ці проекти - лише кілька прикладів багатьох проектів з відкритим кодом, зосереджених на застосуванні передових методів керування в БПЛА, таких як Sparky2, CC3D, Atom, ArduPilot Mega APM, FlyMaple та Erle-Brain3. Використовуючи ці проекти, дослідники та розробники отримують доступ до передових інструментів та алгоритмів, які можна використовувати для розробки передових БПЛА.

Апаратне забезпечення системи керування

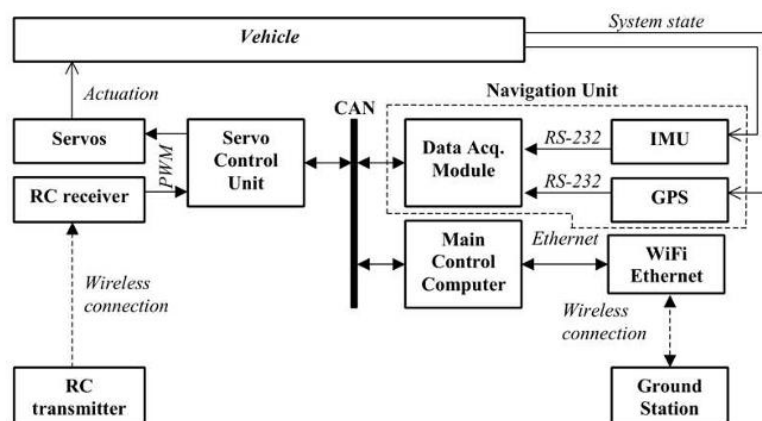


Рисунок 3.1 - Блок-схема системи управління

Технічні характеристики: РАМА має бути повністю автономною системою керування для будь-якого типу БПЛА. Вона легка (приблизно 1,5 кг) та компактна (330x160x65 мм), що дозволяє її використання навіть у невеликих БПЛА. Хоча ми використовуємо систему РАМА для керування аматорським гелікоптером, за потреби її можна застосувати і для літаків з фіксованим крилом. Усі життєво важливі частини системи знаходяться в повітрі. Це включає систему збору даних (датчики та їх керування), систему керування та систему зв'язку.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

Наземна станція (GS) служить лише для збору та візуалізації онлайн-телеметрії. Загалом кажучи, RAMA повинна бути здатною виконувати заздалегідь запрограмовану місію або принаймні переходити в певний режим безпеки (аварійна посадка, зависання або орбіта) у разі втрати бездротового з'єднання з GS. Це кінцева мета на майбутнє.

Для легкого розширення, RAMA розроблена як мережева ієрархічна розподілена система, що досить поширено в наші дні. Вона складається з кількох практично незалежних функціональних блоків, як видно з блок-схеми (Рисунок 3.1). Тільки передавач/приймач RC та серводвигуни є стандартним обладнанням моделювання, всі інші частини є нашим власним внеском. Ці блоки (або *вузли*) з'єднані між собою CAN 2.0b (Controller Area Network), відомою послідовною шиною, що використовується переважно в автомобільній промисловості. Така архітектура не тільки дозволяє відносно легко розширювати систему, але й сприяє її надійності (відмова одного з вузлів не обов'язково порушує функцію інших) та спрощує тестування та налагодження системи. Як буде показано пізніше, RAMA має лише один критичний вузол, несправність якого призведе до неминучої аварії керованого транспортного засобу. Усі інші вузли можуть вийти з ладу, але принаймні ручне керування буде збережено.

У нашому випадку для CAN-зв'язку використовується швидкість передачі даних 100 кбіт/с. Завантаження шини становить 20%, тому немає проблем зі значними затримками пакетів. Поведінка в реальному часі також забезпечується пріоритетами пакетів та неруйнівним арбітражем, тому проблем, пов'язаних з тремтінням, не виникло. Загальну поведінку шини та середні/екстремальні затримки даних оцінювали статистично.

Основним елементом системи RAMA є *головний керуючий комп'ютер* (MCC), де виконуються алгоритми керування та зв'язку. MCC підключений до наземної станції (GS) через

Бездротове з'єднання Ethernet (IEEE 802.11b, WiFi). Швидкість передачі даних становить 11 Мбіт/с, чого більш ніж достатньо для нашої програми, оскільки пакети телеметричних даних мають довжину лише близько 200 байт і

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надсилаються 32 рази на секунду. Це призводить до приблизно 0,6% використання шини, тому немає проблем із реальним часом. Телеметрія в будь-якому разі є м'яким завданням реального часу. У разі втрати зв'язку дані зберігаються в буфері та надсилаються в автономний режим, як тільки з'єднання відновлюється. Зв'язок WiFi не є критичним, оскільки він використовується лише для телеметрії та дистанційного моніторингу системи. Команди для автопілота (перемикання режимів автоматичного/ручного керування та бажані значення для контролерів) видаються через систему моделювання RC, яка є набагато надійнішою та має набагато ширший радіус дії. З'єднання WiFi буде замінено в майбутньому кращою системою. Воно призначене для тимчасового використання, щоб пришвидшити процес розробки.

Вхідні дані контролера, такі як поточне положення та положення апарата в просторі, надаються *навігаційним блоком* (NU). Цей блок включає *інерціальний вимірювальний блок* (IMU) та *глобальну систему позиціонування* (GPS). Наразі його розширюють тривісним магнітометром для спрощення визначення кутів польоту.

На даний момент кути польоту визначаються з виміряних прискорень. Прискорення вільного падіння можна розкласти на три компоненти, паралельні осям транспортного засобу. Ці компоненти вимірюються акселерометрами, а кути можна визначити за допомогою тріангуляції (з одним ступенем свободи, тобто один з кутів буде невизначеним і має бути визначений іншими способами, наприклад, інтегруванням кутової швидкості). Недоліком цього методу є те, що акселерометри вимірюють не тільки прискорення g , але й прискорення транспортного засобу, які накладаються на g . Прискорення транспортного засобу можна фільтрувати за допомогою низькочастотного фільтра, але це вносить затримку в процес. Зручнішим методом є використання трьох взаємно перпендикулярних магнітометрів, які вимірюють компоненти вектора магнітного поля Землі. На магнітометри не впливає динаміка транспортного засобу, і кути можна визначати так само, як і з акселерометрів. Крім того, можна використовувати дані як акселерометра, так і магнітометра, і уточнювати

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обчислення за допомогою фільтра Калмана.

Виконавчі механізми (у нашому випадку це серводвигуни, що керують колективним та циклічним керуванням, кроком хвостового ротора та дросельною заслінкою) керуються блоком *сервокерування* (SCU). Усі сервоприводи та приймач RC підключені до цього блоку. Його призначення - керувати сервоприводами відповідно до команд від МСС або приймача RC та перемикатися між автоматичним та ручним режимами керування. Це єдина критична точка системи RAMA, вихід з ладу якої був би фатальним.

2) *Основні факти та ідеї*: По суті, система може працювати у двох режимах. Або в *режимі ручного керування* (MCM), коли транспортний засіб повністю керується людиною-пілотом, а RAMA служить лише телеметричним пристроєм; або в *режимі автоматичного керування* (ACM), коли RAMA бере на себе керування деякими (або всіма) виконавчими механізмами. З точки зору розробки контролера, іноді зручно, якщо автоматичне керування може застосовуватися лише до вибраних виконавчих механізмів, тоді як інші керуються вручну; саме тому цей *напіваавтоматичний режим*...

опцію було реалізовано.

Незалежно від режиму роботи, всі *операційні дані* (ОД) (вимірювані змінні транспортного засобу та змінні системи керування) збираються та надсилаються на наземну станцію (ГС) в режимі онлайн. Ці ОД (операційні дані) включають:

Вимірювані змінні транспортного засобу

- Кутові швидкості навколо поперечної (*швидкість тангажу*), поздовжньої (*швидкість крену*) та ризькування (*швидкість ризькування*) осей транспортного засобу
- Прискорення в поперечній (x), поздовжній (y) та поворотній (z) осях транспортного засобу
- Висота над рівнем моря та швидкість польоту (розкладені на компоненти x, y та z)
- Географічне положення (широта та довгота)

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Положення виконавчих механізмів
- Положення важелів керування на пульті дистанційного керування
- Змінні системи керування
- Режим роботи (автоматичний / ручний)
- Змінні стану контролера(ів)
- Сповіщення про помилки

Дані OD дискретизуються синхронно з частотою 32 Гц. Повідомлення синхронізації CAN періодично надсилається всім вузлам, щоб забезпечити одночасну вибірку всіх даних. Усі змінні транспортного засобу надсилаються до МСС. Під час роботи в режимі АСМ значення дії обчислюється та застосовується до виконавчих механізмів одразу після завершення обчислення. У МСМ змінні стану контролера встановлюються таким чином, щоб значення дії дорівнювало поточному значенню ручної дії, щоб забезпечити плавний перехід керування у разі зміни режиму ручного керування на автоматичний. Після цього складається телеметричне повідомлення, що містить OD, та миттєво надсилається на наземну станцію (GS).

3) *Головний керуючий комп'ютер:* Щоб скоротити час проектування, було вирішено не розробляти спеціалізований МСС для проекту, а натомість придбати стандартний продукт. Далі було проведено ретельне дослідження ринку, і зрештою було обрано лінійку продуктів EXM32 SH7760 від німецької компанії MSC [20].

Система EXM32 має 64 МБ SDRAM, до 32 МБ FLASH-пам'яті та безліч периферійних пристроїв (2 контролери CAN, 10/100 Ethernet, USB, роз'єм Compact Flash, 6 UART, VGA та інші). Завдяки невеликим розмірам друкованої плати Eurocard (160x100 мм) та відносно низькому енергоспоживанню (приблизно 250 мА при 12 В постійного струму, тобто 3 Вт, у нашому випадку), EXM32 є ідеальною обчислювальною платформою для системи RAMA, здатною виконувати складні алгоритми керування в режимі реального часу.

4) *Блок сервокерування:* Блок сервокерування (SCU) – це простий спеціально розроблений вбудований комп'ютер, побудований на базі

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроконтролера Renesas 2638F, який служить для керування серводвигунами. По суті, SCU може працювати у двох режимах: в автоматичному або в ручному режимі керування (АСМ та МСМ). В АСМ сигнали від RC-приймача зчитуються та надсилаються до МСС, а сигнали для серводвигунів генеруються SCU відповідно до команд від МСС. У МСМ сигнали від RC-приймача зчитуються та надсилаються до МСС, а також надсилаються безпосередньо до серводвигунів. Тому, якщо решта системи RAMA вийде з ладу і залишиться в силі лише SCU, все ще можливо підтримувати ручне керування.

5) *Навігаційний блок*: Навігаційний блок (NU) складається з трьох основних частин. Основним елементом є *модуль збору даних* (DAM)), заснований на мікроконтролері Philips LPC2119 з ARM-ядро, призначенням якого є отримання даних з різних типів датчиків, їх попередня обробка та надсилання результатів до МСС. Крім того, DAM також надає системі повідомлення синхронізації часу. Наразі до DAM підключено два сенсорні блоки; перший - інерціальний вимірювальний блок (IMU), а інший - приймач глобальної системи позиціонування (GPS).

MICRO-ISU BP-3010 [21] використовується як інерціальний вимірювальний блок (IMU). Це зручний маленький пристрій розміром лише 35x22x12 мм і вагою крихітні 30 г, зі споживанням енергії 0,5 Вт, який містить 3 акселерометри та 3 гіроскопи, що забезпечують вимірювання прискорень та кутових швидкостей по всіх 3 осях транспортного засобу. Діапазон вимірювання становить ± 10 г / ± 300 °/с при частоті дискретизації 64 Гц.

Як GPS-приймач використовується приймач Garmin GPS 16-HVS [22]. Це OEM-модуль GPS з інтегрованою антеною та можливістю WAAS (система доповнення широкого радіуса дії). Дані дискретизуються з частотою 1 Гц.

С. Програмне забезпечення системи керування

Програмне забезпечення МСС: Програмне забезпечення, що працює на МСС (головному керуючому комп'ютері), можна розділити на кілька рівнів (див. Рисунок 3). Його основні завдання такі:

- Зберіть OD (операційні дані) з датчиків та виконавчих механізмів

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Обчисліть керуючу дію та передайте її на виконавчі механізми
- Зв'язок з наземною станцією (GS)

Найвищий рівень – це *рівень алгоритму керування* (CAL). Його завданням є генерація сигналів керування відповідно до OD.

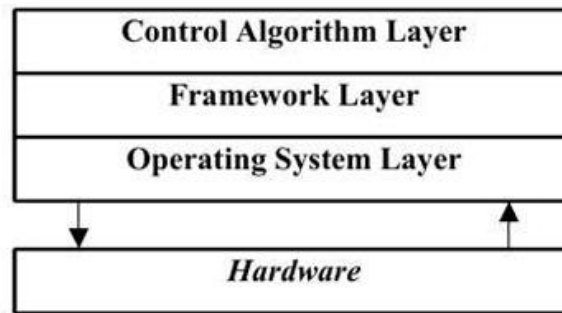


Рисунок 3.2 - Структура системного програмного забезпечення

Нижчий рівень – це *шар фреймворку* (FL), який відокремлює контролер від операційної системи та апаратного забезпечення. CAL взаємодіє з FL за допомогою стандартизованого інтерфейсу, а FL виконує решту роботи, тобто збирає OD з базових вузлів CAN, надсилає команди контролера до виконавчих механізмів та взаємодіє з GS.

операційної *системи* (OSL) представляє собою ОС. Наразі для цієї мети ми використовуємо Linux 2.6.14.

Програмне забезпечення MCC можна легко оновити через бездротове з'єднання Ethernet (WiFi) без необхідності фізичного підключення до системи. Це значною мірою сприяє можливості тестування різних версій програмного забезпечення та контролера протягом дня польоту, оскільки все програмне забезпечення можна змінити за лічені секунди. Навіть прошивку інших вузлів системи можна отримати та оновити дистанційно (докладніше див. наступний розділ).

Програмне забезпечення DAM та SCU: DAM (модуль збору даних) та SCU (блок сервокерування) працюють безсистемно. Їхні програми максимально прості для забезпечення надійності, особливо у випадку SCU, оскільки це

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

найважливіша частина RAMA.

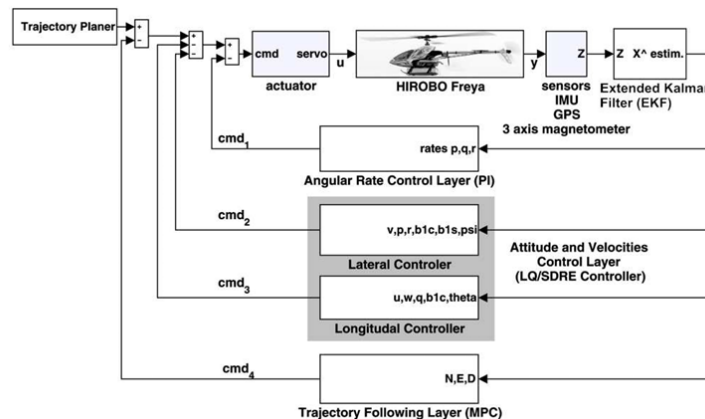


Рисунок 3.3 - Ієрархічна структура автопілота

Щоб забезпечити дистанційне оновлення програмного забезпечення, коли система підключена до БПЛА, обидва модулі оснащені завантажувачами, що дозволяють завантажувати прошивку через шину CAN. Оновлення прошивки можна виконувати за допомогою бездротового зв'язку - нова прошивка завантажується в МСС, а потім в модулі за допомогою CAN. Таким чином, все програмне забезпечення можна змінювати дистанційно, без необхідності роз'єднання системи.

БПЛА - це сильно нелінійна, нестійка система з 6 ступенями свободи (DOF). Її математичну модель можна отримати шляхом розширення динаміки твердого тіла з урахуванням зовнішніх моментів і сил, що діють на нього [6]. По суті, БПЛА має 4 входи (поздовжній та поперечний циклічний, колективний та поворотний) та 6 виходів (3 виміри положення в просторі та 3 кути Ейлера). З точки зору інженера-керувальника, це одна з найскладніших систем для роботи. На додачу до всього, існують також деякі взаємозалежності, наприклад, поздовжня та поперечна динаміка взаємопов'язані.

Було досліджено та протестовано кілька математичних моделей, більш-менш складних. Для початкового проектування контролера було обрано добре відому модель простору з 10 станами [11]: $[u, v, w, p, q, r, \phi, \psi, \theta, \alpha]$, де u, v, w - швидкості тіла, p, q, r - кутові швидкості, $[p_l, q_l, r_l]$ описують

БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ					Арк.
					76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

махання площини верхівки основного ротора, i , нарешті, ψ , ϕ – кути Ейлера. Ідентифікація параметрів моделі для гелікоптера Freya була обмежена попередньою обробкою сигналу, необхідною через високий рівень вібраційного шуму, що накладається на спостережувані сигнали. Його усунення було вирішено за допомогою фільтра Калмана для гауссового кольорового шуму [24]. Модель була реалізована за допомогою символічного інструментарію Matlab як модель простору станів із зовнішнім шумом [13], тому її модифікацію (додавання нових станів для оцінки невідомих/неточних параметрів моделі, зміщень датчиків та зміщення осей IMU) можна було легко виконати.

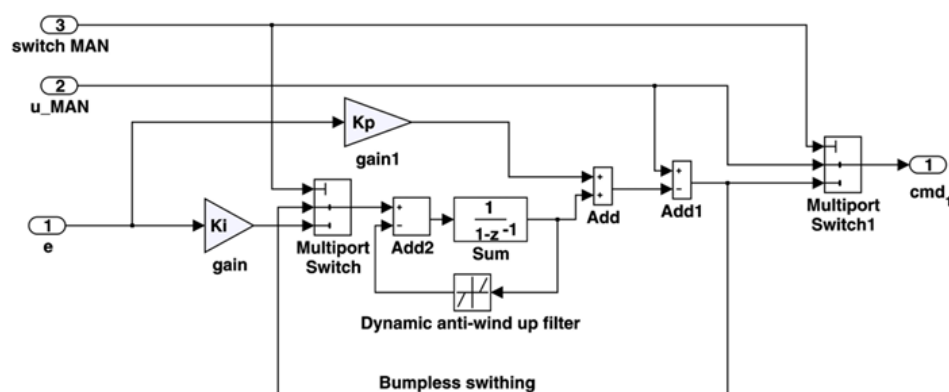


Рисунок 3.4 - Конструкція стабілізатора кутової швидкості типу PI

Програмне забезпечення для розробки високорівневих БПЛА та їх категоризація. Програмне забезпечення для розробки БПЛА високого рівня стосується програмного забезпечення, яке забезпечує зручний інтерфейс для розробки, тестування та розгортання алгоритмів керування та навігації для БПЛА. Цей тип програмного забезпечення спрощує процес розробки та тестування алгоритмів керування, пропонуючи абстрактний, високорівневий інтерфейс, який не вимагає глибоких знань базових апаратних та програмних систем [30]. Програмне забезпечення для розробки БПЛА високого рівня можна розділити на п'ять основних класів, як зазначено нижче.

Програмне забезпечення для моделювання

Програмне забезпечення для моделювання відіграє вирішальну роль у створенні віртуальних середовищ для тестування та оцінки БПЛА, усуваючи потребу у фізичних прототипах. Програма моделювання пропонує точні та правдоподібні результати для проектування фінансової системи до її фактичного впровадження. Тим не менш, аспект моделювання може створювати певні перешкоди, які можуть перешкоджати досягненню бажаних результатів, якщо їх не враховувати належним чином, такі як вплив таких збурень, як вітер, різкі зміни погоди, неочікувані помилки в динамічній системі або будь-які непередбачені обставини. Деякі широко використовувані інструменти програмного забезпечення для моделювання в галузі БПЛА включають gazebosim, AirSim, Webots, Morse, jMAVSim, New Paparazzi Simulator, HackflightSim та Matlab UAV Toolbox. Можливості кожного програмного забезпечення для моделювання наведено в таблиці. 3.2, виходячи з їхніх переваг та недоліків.

Таблиця 3.2

Порівняння переваг і недоліків популярних програм для моделювання.

ПЗ для симуляції	Переваги (Pros)	Недоліки (Cons)
UAV Toolbox MATLAB	Найбільш відоме та вживане ПЗ; підтримує складні симуляції; має зручні готові набори інструментів (toolboxes); часто згадується в наукових працях.	Періодично потребує великих обчислювальних ресурсів та займає багато часу.
GazeBoSim	Високореалістичне середовище з графічним інтерфейсом; відкритий сирцевий код; широка підтримка сенсорів; інтеграція з ROS.	Складне у навчанні; ресурсомістке; обмежена динаміка реального світу; проблеми зі стабільністю (стрибки робота при зіткненнях).
AirSim	Висока точність фізичного моделювання; підтримка декількох транспортних засобів та сенсорів; інтеграція з популярними фреймворками.	Високі вимоги до обчислювальної потужності; баги стабільності (синхронізація сенсорів, помилки зв'язку).

Програмне забезпечення для керування польотом

Програмне забезпечення для керування польотом відповідає за керування польотними операціями БПЛА та бортовими системами, включаючи камери та

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

датчики. Серед відомих платформ програмного забезпечення для керування польотом є ArduPilot, PX4, Paparazzi, серія Multiwii, Cleanflight, Betaflight, INAV та серія OpenPilot (LibrePilot, dRonin).

Програмне забезпечення для наземного контролю

Програмне забезпечення для наземного керування дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг та керування БПЛА. Це надає операторам телеметричні дані, можливості встановлення точок маршруту та опції керування польотом. Популярні платформи програмного забезпечення для наземного керування включають Ardupilot Mission Planner, QGroundControl та UgCS.

Програмне забезпечення для комп'ютерного зору

Програмне забезпечення комп'ютерного зору відіграє життєво важливу роль в обробці та аналізі зображень і відео, отриманих безпілотними літальними апаратами. Воно широко використовується в таких програмах, як аерокартографування, геодезична зйомка та інспекція. До відомих програмних інструментів комп'ютерного зору в галузі безпілотних літальних апаратів належать OpenCV, TensorFlow та PyTorch.

Програмне забезпечення для інтеграції датчиків

Програмне забезпечення для інтеграції датчиків сприяє інтеграції різних датчиків та систем у платформи БПЛА. Воно забезпечує безперешкодну інтеграцію таких датчиків, як LiDAR, тепловізійні камери та мультиспектральні камери. До відомих програмних інструментів для інтеграції датчиків у галузі БПЛА належать ROS та MAVLink. Ці приклади представляють лише частину програмних інструментів для розробки БПЛА, які зазвичай використовуються в галузі. Для конкретних застосувань та випадків використання доступні численні інші спеціалізовані програмні інструменти. Відкритий код багатьох із цих інструментів сприяв швидкому розвитку технології БПЛА та розквіту галузі.

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Оцінка ефективності, результати експериментів та перспективи розвитку

Сфера безпілотних літальних апаратів (БПЛА) представляє кілька відкритих питань, з якими дослідники наразі стикаються. Ці проблеми охоплюють обмеження в експлуатаційних можливостях, зокрема автономність польоту, планування маршруту, термін служби акумулятора, час польоту та обмежену здатність перевозити корисне навантаження. Іншим суттєвим викликом є інтеграція БПЛА в ланцюг надання допомоги для подолання конкретних перешкод, з якими стикаються міжнародні гуманітарні організації (МГО).

Розгортання роїв БПЛА в різноманітних середовищах створює різні перешкоди, такі як прийняття рішень, контроль, планування шляху, зв'язок, моніторинг, відстеження, цільове призначення, зіткнення та уникнення перешкод. Крім того, проблеми безпеки, конфіденційності, захисту та потужності в безпілотних системах посилюють існуючі проблеми. Наприклад, відсутність сповіщень GPS про навколишні райони створює потенційні ризики для безпеки, тоді як проблеми конфіденційності виникають через збір персональних даних БПЛА. Вразливість сигналів БПЛА до спроб злому або глушіння також становить проблему безпеки. Інші проблеми БПЛА можна підсумувати, зокрема, забезпечуючи безпеку конфіденційних даних, оскільки відсутність шифрування наражає БПЛА на ризики викрадення даних та потенційні загрози витоку даних.

Більше того, потреба в довгих польотах для досягнення більшого економічного ефекту створює проблему, пов'язану з потужністю. Крім того, відсутність стандартизації в експлуатації БПЛА перешкоджає їх широкому використанню. Неоднозначність та відсутність суттєвих стандартів правил впливають на різні аспекти, такі як правила повітряного простору, обмеження ваги та розміру, міркування конфіденційності та вимоги безпеки. Використання бездротових датчиків має вирішальне значення для забезпечення роботи

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтелектуальних систем управління рухом та підвищення продуктивності БПЛА. БПЛА стикаються з обмеженнями в дальності передачі, можливостях обробки та швидкості. Усунення цих обмежень вимагає дослідницького внеску для розвитку технології БПЛА. Розподіл ресурсів створює проблему з точки зору оптимізації планування траєкторії БПЛА та розподілу ресурсів для підвищення операційної ефективності та продуктивності. Обмеження швидкості можуть бути подолані регуляторними органами, що дозволяють БПЛА працювати на великих висотах. Обмеження потужності та термін служби батареї є критичними проблемами, які необхідно вирішити для покращення експлуатації БПЛА. Це включає вирішення питань споживання енергії, збільшення терміну служби акумуляторів та розробку ефективних методів заряджання. Крім того, визначено кілька викликів та проблем, зокрема проблеми соціального сприйняття, проблеми конфіденційності та безпеки, а також екологічні проблеми. Однак основною проблемою в галузі БПЛА є комунікація, яку можна вирішити завдяки розвитку мікропроцесорів, що дозволяє здійснювати інтелектуальне автономне керування різними системами. Дрони мають такі відмінні характеристики, як динамічна мобільність вузлів та топологія мережі, змінна продуктивність мережі, дальність польоту, автономні та дистанційні операції, швидка доставка даних та економічна ефективність. Ми класифікували відкриті питання БПЛА за різними категоріями, як показано на рисунку 3.5. Ці категорії охоплюють проблеми, пов'язані з працездатністю, технологіями, регуляторними аспектами, безпекою, конфіденційністю та захищеністю. Важливо зазначити, що між цими класами може бути перетин, оскільки певні напрямки досліджень можуть мати наслідки для кількох категорій. Крім того, ця класифікація не є вичерпною, і можуть існувати альтернативні класифікації, засновані на різних перспективах або точках зору.

Напрямки майбутніх досліджень

У сфері безпілотних літальних апаратів спостерігаються майбутні тенденції досліджень, що охоплюють різні області. Однією з визначних областей є ройові системи БПЛА, де кілька дронів співпрацюють для досягнення спільних

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цілей у різних застосуваннях, таких як військова розвідка та точне землеробство. Розподіл ресурсів, уникнення перешкод, відстеження, планування шляху та планування роботи батарей у ройових системах БПЛА значною мірою залежать від алгоритмів машинного та глибокого навчання. Ці алгоритми сприяють розробці менших, легших та розумніших нано-БПЛА.

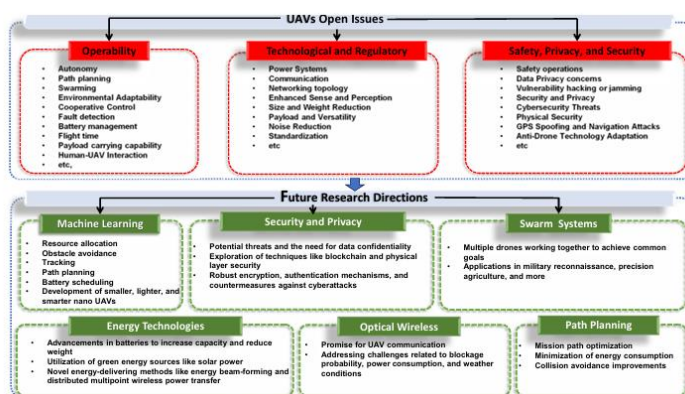


Рисунок 3.5 - Невирішені питання та напрямки майбутніх досліджень у галузі безпілотних літальних апаратів

Безпека та конфіденційність є критично важливими міркуваннями в системах БПЛА, враховуючи потенційні загрози та необхідність захисту конфіденційності даних. Потрібні подальші дослідження для вивчення таких методів, як блокчейн та безпека фізичного рівня, для ефективного вирішення цих проблем. Крім того, слід удосконалити методи планування траєкторії та шляху, щоб оптимізувати маршрути польоту, мінімізувати споживання енергії та забезпечити уникнення зіткнень.

Досягнення в технологіях заряджання енергії є життєво важливими для підвищення продуктивності БПЛА. Це включає розробку вдосконалених акумуляторів та використання зелених джерел енергії, таких як сонячна енергія, для збільшення часу польоту. Новітні методи подачі енергії, такі як формування енергетичного променя та розподілена багатоточкова бездротова передача енергії (WPT), також можуть підвищити ефективність заряджання.

Оптичний бездротовий зв'язок (OWC) є перспективним для зв'язку з

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

БПЛА. Однак, для забезпечення надійного та ефективного зв'язку в системах БПЛА необхідно вирішити проблеми, пов'язані з ймовірністю блокування, споживанням енергії та погодними умовами.

Для покращення загальної продуктивності БПЛА можна впровадити кілька рекомендацій. По-перше, вдосконалення технологій акумуляторів для збільшення ємності та зменшення ваги, а також впровадження ефективних методів заряджання, таких як бездротова або сонячна енергія, значно покращать експлуатацію БПЛА. По-друге, системи запобігання зіткненням можна покращити завдяки розробці передових алгоритмів та сенсорних технологій. Штучний інтелект та машинне навчання можна використовувати для автономного прийняття рішень у сценаріях запобігання зіткненням. По-третє, безпеку систем БПЛА слід посилити шляхом впровадження надійного шифрування, механізмів автентифікації та ефективних контрзаходів проти кібератак. Нарешті, вкрай важливо встановити чіткі та вичерпні правила експлуатації БПЛА, включаючи рекомендації щодо автономних роїв БПЛА. Ці правила повинні враховувати питання безпеки, конфіденційності та екологічних аспектів, щоб забезпечити відповідальне та стале розгортання БПЛА.

На завершення, у цій роботі представлено комплексний та поглиблений аналіз розвитку БПЛА, що охоплює різні напрямки досліджень за останні три роки, потенційні напрямки відкритого розвитку, напрямки розвитку керування літальними апаратами, архітектури апаратного та програмного забезпечення, застосування та ключові тенденції в цій галузі. Завдяки використанню бази даних Scopus та експертного аналізу, ця робота проливає світло на останні тенденції досліджень БПЛА та взаємодію між ними. Крім того, у цій роботі висвітлено інтеграцію передових технологій, таких як штучний інтелект, зв'язок, Інтернет речей, виявлення літальних апаратів, керування та автономний політ, сприйняття та зондування, моніторинг та збереження навколишнього середовища, мініатюризація, роїння та кооперативне керування, а також можливості трансформації, як потенційні напрямки відкритого розвитку БПЛА. У ній також обговорюються класичні, сучасні, інтелектуальні та адаптивні методи керування,

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що розширюють межі керування БПЛА за допомогою передових тенденцій, та важливість вибору відповідних алгоритмів керування.

У роботі також наведено уявлення про фундаментальні апаратні та програмні архітектури БПЛА, включаючи бортові комп'ютери та контролери, датчики, виконавчі механізми, акумулятори, інтерфейси зв'язку, корисне навантаження та структурні компоненти. У ньому обговорюються різноманітні застосування БПЛА та їхні основні проблеми, а також ключові тенденції в проектах програмного та апаратного забезпечення БПЛА з відкритим кодом. На завершення, ця робота служить цінним ресурсом для дослідників, розробників та практиків, які зацікавлені в тому, щоб бути в курсі останніх досягнень у розробці БПЛА та тенденціях досліджень. Вона надає всебічний огляд ключових аспектів розробки БПЛА, визначає потенційні напрямки відкритого розвитку, обговорює напрямки розвитку керування літальними апаратами та досліджує різноманітні застосування та основні проблеми в цій галузі. Завдяки своєму всебічному аналізу та висновкам, ця робота робить незамінний внесок у наукову літературу про БПЛА, надаючи цінні рекомендації для майбутніх досліджень та розробок у цій динамічній галузі.

3.4 Висновок по розділу

У третьому розділі було розглянуто розробку, інтеграцію та оцінку ефективності програмних рішень для моніторингу та керування БПЛА. Проведено проєктування програмної архітектури системи керування безпілотним літальним апаратом з урахуванням вимог до надійності та масштабованості. Досліджено особливості апаратно-програмної інтеграції та реалізації системи, що забезпечують стабільне функціонування БПЛА в різних умовах експлуатації. Також виконано оцінку ефективності розробленого рішення, проаналізовано результати експериментів та визначено перспективи подальшого розвитку систем моніторингу і керування безпілотними літальними апаратами.

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської роботи було розроблено програмне рішення для моніторингу та керування безпілотними літальними апаратами, що є комплексним процесом, спрямованим на створення надійної, масштабованої та ефективної системи управління БПЛА. У роботі проаналізовано сучасні підходи та існуючі рішення у даній сфері, досліджено особливості функціонування безпілотних систем, а також визначено ключові вимоги до програмного забезпечення для забезпечення стабільної роботи в умовах реального часу. Процес розробки охопив аналіз предметної області, проєктування архітектури, реалізацію функціональних модулів, тестування та оцінку ефективності системи.

На початковому етапі було проведено аналіз вимог до системи, визначено функціональні та нефункціональні характеристики, що включають обробку телеметричних даних, забезпечення взаємодії з оператором, підтримку стабільного зв'язку та високий рівень безпеки. Особлива увага приділялася вимогам до продуктивності, масштабованості та відмовостійкості системи, що є критично важливими для застосування БПЛА в різних сферах. Моделювання бізнес-логіки дозволило структурувати процеси обробки даних — від збору інформації з датчиків до її аналізу та відображення користувачу.

У процесі реалізації було розроблено архітектуру програмної системи, що забезпечує взаємодію між апаратною частиною БПЛА та програмними компонентами керування. Реалізовано модулі збору та обробки телеметрії, візуалізації даних та керування апаратом у реальному часі. Особлива увага приділялася забезпеченню стабільності роботи системи, обробці помилок, а також захисту переданих даних. Використання сучасних підходів до розробки дозволило забезпечити гнучкість системи та можливість її подальшого розширення.

Було проведено комплексне тестування програмного забезпечення, що включало модульні, інтеграційні та навантажувальні тести. У ході тестування було виявлено потенційні проблеми, пов'язані із затримками передачі даних та

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробкою великих обсягів інформації, що дозволило оптимізувати алгоритми обробки та покращити загальну продуктивність системи. Оцінка ефективності показала, що розроблене рішення відповідає поставленим вимогам та забезпечує стабільну роботу в умовах змінного навантаження.

Загалом, розроблене програмне рішення досягає поставленої мети — забезпечує ефективний моніторинг та керування безпілотними літальними апаратами, дозволяє обробляти дані в реальному часі та надає зручний інтерфейс для оператора. Основними перевагами є модульна архітектура, можливість масштабування, підтримка інтеграції з різними типами апаратних платформ та адаптивність до різних сценаріїв використання.

Разом із тим, існують певні обмеження, зокрема залежність від якості каналів зв'язку, потреба в подальшій оптимізації алгоритмів обробки даних та вдосконаленні механізмів безпеки. У перспективі система може бути розширена за рахунок впровадження алгоритмів штучного інтелекту для автономного керування, інтеграції з хмарними сервісами, а також підтримки групового керування декількома БПЛА. Це дозволить значно підвищити ефективність використання безпілотних систем та розширити сфери їх застосування.

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. UAV Systems Research. (2025). Overview of UAV Technologies. [uavsystems.org](https://www.uavsystems.org). <https://www.uavsystems.org>
2. PX4 Autopilot Documentation. (2025). [px4.io](https://docs.px4.io). <https://docs.px4.io>
3. ArduPilot Documentation. (2025). ardupilot.org. <https://ardupilot.org>
4. Dronecode Foundation. (2025). Open Source UAV Platform. dronecode.org. <https://dronecode.org>
5. Microsoft Azure IoT Hub. (2025). [learn.microsoft.com](https://learn.microsoft.com/en-us/azure/iot-hub). <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/iot-hub>
6. AWS IoT Core Documentation. (2025). [docs.aws.amazon.com](https://docs.aws.amazon.com/iot). <https://docs.aws.amazon.com/iot>
7. Google Cloud IoT. (2025). [cloud.google.com](https://cloud.google.com/iot). <https://cloud.google.com/iot>
8. MQTT Protocol Specification. (2024). mqtt.org. <https://mqtt.org>
9. OPC UA Standard. (2024). opcfoundation.org. <https://opcfoundation.org>
10. ROS (Robot Operating System). (2025). [ros.org](https://www.ros.org). <https://www.ros.org>
11. OpenCV Documentation. (2025). [opencv.org](https://docs.opencv.org). <https://docs.opencv.org>
12. TensorFlow Documentation. (2025). [tensorflow.org](https://www.tensorflow.org). <https://www.tensorflow.org>
13. PyTorch Documentation. (2025). pytorch.org. <https://pytorch.org>
14. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. [mit.edu](https://www.deeplearningbook.org). <https://www.deeplearningbook.org>
15. Sutton, R., & Barto, A. (2018). Reinforcement Learning: An Introduction. [mit.edu](https://web.stanford.edu/class/psych209/Readings/SuttonBartoIPRLBook2ndEd.pdf). <https://web.stanford.edu/class/psych209/Readings/SuttonBartoIPRLBook2ndEd.pdf>
16. IEEE. (2024). UAV Communication Systems. [ieee.org](https://ieeexplore.ieee.org). <https://ieeexplore.ieee.org>
17. ICAO. (2024). Unmanned Aircraft Systems Regulations. [icao.int](https://www.icao.int). <https://www.icao.int>

					БР.ІІІ - 68.00.00.000 ІІЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. EASA. (2025). Drone Regulations in Europe. [easa.europa.eu](https://www.easa.europa.eu).
<https://www.easa.europa.eu>
19. FAA. (2025). Unmanned Aircraft Systems. [faa.gov](https://www.faa.gov/uas).
<https://www.faa.gov/uas>
20. Zhang, C., & Kovacs, J. (2023). The application of small UAVs in precision agriculture. Precision Agriculture Journal. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-09987>
21. Waharte, S., & Trigoni, N. (2023). Supporting Search and Rescue Operations with UAVs. IEEE. <https://doi.org/10.1109>
22. Gupta, L., Jain, R., & Vaszkun, G. (2023). Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. IEEE Communications Surveys.
23. Bekmezci, I., Sahingoz, O., & Temel, S. (2023). Flying Ad-Hoc Networks (FANETs). Ad Hoc Networks Journal.
24. Cisco. (2024). IoT and Edge Computing for UAV Systems. [cisco.com](https://www.cisco.com).
<https://www.cisco.com>
25. NVIDIA Jetson Platform. (2025). [developer.nvidia.com](https://developer.nvidia.com/embedded-computing).
<https://developer.nvidia.com/embedded-computing>
26. Docker Documentation. (2025). [docker.com](https://docs.docker.com). <https://docs.docker.com>
27. Kubernetes Documentation. (2025). [kubernetes.io](https://kubernetes.io/docs).
<https://kubernetes.io/docs>
28. .NET Documentation. (2025). [learn.microsoft.com](https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet).
<https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet>
29. ASP.NET Core Web API. (2025). [learn.microsoft.com](https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/web-api).
<https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/web-api>
30. PostgreSQL Documentation. (2025). [postgresql.org](https://www.postgresql.org/docs).
<https://www.postgresql.org/docs>
31. MongoDB Documentation. (2025). [mongodb.com](https://www.mongodb.com/docs).
<https://www.mongodb.com/docs>
32. Redis Documentation. (2025). [redis.io](https://redis.io/docs). <https://redis.io/docs>

33. WebSocket Protocol RFC 6455. (2024). ietf.org.
<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6455>
34. REST API Design Guide. (2024). restfulapi.net. <https://restfulapi.net>
35. OWASP Top Ten Security Risks. (2024). owasp.org.
<https://owasp.org/www-project-top-ten/>
36. Stallings, W. (2022). Wireless Communications and Networks. Pearson.
37. Sommerville, I. (2021). Software Engineering (10th ed.). Pearson.
38. Martin, R. C. (2017). Clean Architecture. pearson.com.
39. Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., & Vlissides, J. (1994). Design Patterns. Pearson.
40. ISO/IEC 12207. (2024). Software Life Cycle Processes. iso.org.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: " Програмні рішення для моніторингу та керування безпілотними літальними апаратами "

Обсяг пояснювальної записки: 86 аркушів

Дата закінчення бакалаврської роботи 10 червня 2026р.

Підпис студента _____

					БР.ІІ - 68.00.00.000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		