

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра обчислювальної техніки

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

Михайло НОВАТАРСЬКИЙ

(підпис)

“ ” _____ 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою “ Комп'ютерні системи та мережі ”
спеціальності 123 “ Комп'ютерна інженерія ”**

на тему: Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі

Виконав : студент 4 курсу, групи ІО-15
(шифр групи)

Григор'єв Костянтин Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник ст.викл. Алєнін О. І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант (нормоконтроль) ас. Міщенко Л. Д.

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра обчислювальної техніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалавр)

Освітньо-професійна програма

“ Комп'ютерні системи та мережі ”

спеціальності 123 “ Комп'ютерна інженерія ”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Михайло НОВАТАРСЬКИЙ

(підпис)

“ ____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврський дипломний проєкт студента

Григор'єва Костянтина Сергійовича

1. Тема проєкту Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі
керівник проєкту Аленін Олег Ігорович, ст. викл.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від

2. Термін здачі студентом закінченого проєкту «2» червня 2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту технічна документація, теоретичні дані.

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

Розділ 1. Аналіз застосування БПЛА у різних сферах.

Розділ 2. Аналіз технологій для розробки системи.

Розділ 3. Проєктування універсального модуля керування через 4G.

Розділ 4. Дослідження та аналіз розробленої системи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним позначенням обов'язкових креслень) структурна схема системи, функціональна схема (діаграма класів), алгоритм дій програмного забезпечення.

6. Консультанта проєкту, з вказівкою розділів проєкту, які до них вносяться

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	Міщенко Л. Д..		

7. Дата видачі завдання «13» січня 2025 р

Календарний план

№ п/п	Найменування етапів дипломного проєкту	Терміни виконання етапів проєкту	Примітки
1.	<i>Затвердження теми проєкту</i>	<i>10.12.2024-15.12.2024</i>	
2.	<i>Вивчення та аналіз завдання</i>	<i>15.12.2024-20.03.2025</i>	
3.	<i>Розробка архітектури та загальної структури системи</i>	<i>20.03.2025-30.03.2025</i>	
4.	<i>Розробка структур окремих підсистем</i>	<i>30.03.2025-10.04.2025</i>	
5.	<i>Програмна реалізація системи</i>	<i>10.04.2025-27.04.2025</i>	
6.	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>27.04.2025-10.05.2025</i>	
7.	<i>Захист програмного продукту</i>	<i>22.05.2025</i>	
8.	<i>Передзахист</i>	<i>27.05.2025</i>	
9.	<i>Захист</i>	<i>20.06.2025</i>	

Студент-дипломник _____ Костянтин ГРИГОР'ЄВ
(підпис)

Керівник проєкту _____ Олег АЛЄНІН
(підпис)

АНОТАЦІЯ

У даній роботі детально проаналізовано застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у різних сферах, а також спроектовано універсальний модуль керування БПЛА через мережу 4G. Розглянуто класифікацію БПЛА за різними параметрами. Досліджено переваги та недоліки сучасних БПЛА.

Окрема увага приділена системам керування БПЛА, зокрема порівнянню різних каналів зв'язку (радіо, Wi-Fi, телеметрія, LTE/4G/5G). Обґрунтовано вибір 4G-зв'язку для реалізації модуля керування.

У практичній частині проекту розроблено універсальний модуль керування на базі контролера Pixhawk, обчислювального модуля Raspberry Pi та 4G-модема. Проведено тестування системи. Програмний продукт був розроблений на мові Python.

ANNOTATION

This work analyzes in detail the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in various fields, and also designs a universal UAV control module via the 4G network. The classification of UAVs according to various parameters is considered. The advantages and disadvantages of modern UAVs are studied.

Particular attention is paid to UAV control systems, in particular, a comparison of different communication channels (radio, Wi-Fi, telemetry, LTE/4G/5G). The choice of 4G communication for the implementation of the control module is justified.

In the practical part of the project, a universal control module based on the Pixhawk controller, Raspberry Pi computing module and 4G modem was developed. The system was tested. The software product was developed in Python.

справки	Формат	Значення	Найменування	Кіл. листів	№ екземпля	Додаток
			Документація загальна			
			Знову розроблена			
	A4	ІАЛЦ.467200.002 ТЗ	Система керування БПЛА	3		
			за допомогою			
			4G мережі			
			Технічне завдання			
	A4	ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Система керування БПЛА	65		
			за допомогою			
			4G мережі			
			Пояснювальна записка			
	A4	ІАЛЦ.467200.004 Д1	Система керування БПЛА	1		
			за допомогою			
			4G мережі			
			Структурна схема системи			
	A4	ІАЛЦ.4672008.005 Д2	Система керування БПЛА	1		
			за допомогою			
			4G мережі			
			Функціональна схема (діаграма класів)			
	A4	ІАЛЦ.467200.006 Д3	Система керування БПЛА	1		
			за допомогою			
			4G мережі			
			Алгоритм дій програмного забезпечення			
	A4	ІАЛЦ.467200.007 Д4	Система керування БПЛА	4		
			за допомогою			
			4G мережі			
			Текст програмного коду			

					ІАЛЦ.467200.001 ОА				
Зм	Лист	№ докум.	Підп	Дата					
Розроб		Григор'єв К. С.			Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі Опис альбому		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев		Аленін О. І.						1	1
							НТУУ "КПІ" ФІОТ Ю-15		

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
ДО ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

на тему: «Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі»

Київ – 2025

ЗМІСТ

НАЙМЕНУВАННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ	2
ПІДСТАВИ ДЛЯ РОЗРОБКИ	2
МЕТА ТА ПРИЗНАЧЕННЯ РОЗРОБКИ.....	2
ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ.....	2
ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ.....	3
Вимоги до розробленого продукту	3
Вимоги до програмного забезпечення	3
Вимоги до апаратної частини	3
ЕТАПИ РОЗРОБКИ	4

					ІАЛЦ.467200.002 ТЗ			
		№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Григор'єв К. С.				Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі Технічне завдання	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Аленін О. І.						1	3
						НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФІОТ, ІО-15		
Н. Контр.	Міщенко Л. Д.							
Затвердив								

1 НАЙМЕНУВАННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ

Дане технічне завдання поширюється на розробку модуля системи керування БПЛА за допомогою 4G мережі, а також на подальшу підтримку та вдосконалення розробленої системи. Областю застосування цієї системи є розвідка, охороно, моніторинг інфраструктури, пошук та рятування, агроаналіз.

2 ПІДСТАВИ ДЛЯ РОЗРОБКИ

Підставою для розробки даної системи є завдання для виконання роботи кваліфікаційно-освітнього рівня «бакалавр інженерії програмного забезпечення», який був затверджений факультетом “Інформатики та обчислювальної техніки” кафедрою обчислювальної техніки Національного технічного Університету України «Київський Політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

3 МЕТА ТА ПРИЗНАЧЕННЯ РОЗРОБКИ

Метою та призначеннями цієї роботи є розробка універсальної, надійної та масштабованої системи керування безпілотним літальним апаратом з використанням 4G/LTE-зв'язку, що забезпечує можливість віддаленого керування, моніторингу та передачі даних у режимі реального часу поза межами прямої видимості

4 ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

Джерелом розробки даного дипломного проекту є офіційні документації, публікації та статті в мережі Інтернет на дану тему, науково-технічна література.

					ІАЛЦ.467200.002 ТЗ	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

5.1. Вимоги до розробленого продукту

Розроблена система має виконувати такі вимоги:

- Стійке керування БПЛА через 4G (LTE).
- Передача телеметрії.
- Підтримка автопілота (Pixhawk/ArduPilot/PX4).
- Захищене з'єднання (VPN/SSH).
- Можливість автономного польоту та повернення.

5.2. Вимоги до програмного забезпечення

- ОС: Windows, Linux або MacOS.
- Розробка: PyCharm або VS Code
- Наземне ПЗ: Mission Planner, QGroundControl.
- Мережа: VPN (WireGuard/OpenVPN), GStreamer, SSH.

5.3. Вимоги до апаратної частини

- Борт: Raspberry Pi 4, LTE-модем, Pixhawk, GPS, камера.
- Наземна станція: ноутбук із доступом до Інтернету.
- Зв'язок: SIM-карта з LTE, резервне живлення.

					ІАЛЦ.467200.002 ТЗ	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6 ЕТАПИ РОЗРОБКИ

Назва етапів виконання	Термін виконання
Затвердження теми роботи	10.12.2024-15.12.2024
Вивчення та аналіз завдання	15.12.2024-20.03.2025
Розробка архітектури та загальної структури системи	20.03.2025-30.03.2025
Розробка структур окремих частин системи	30.03.2025-10.04.2025
Програмна реалізація системи	10.04.2025-27.04.2025
Виправлення помилок	27.04.2025-10.05.2025
Оформлення пояснювальної записки	10.12.2024-15.12.2024

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ**

на тему: «Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі»

Київ – 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА У РІЗНИХ СФЕРАХ	6
1.1 Класифікація безпілотних літальних апаратів	6
1.1.1 Класифікація за типом системи управління.....	6
1.1.2 Класифікація за часом одержання зібраної інформації	9
1.1.3 Класифікація за типом літального апарату	10
1.1.4 Класифікація за масою	12
1.1.5 Класифікація за радіусом дії.....	12
1.2 Сфери застосування БПЛА	13
1.2.1 Військова справа	13
1.2.2 Сільське господарство	16
1.2.3 Геодезія та картографія	17
1.2.4 Моніторинг інфраструктури	18
1.2.5 Рятувальні операції	19
1.3 Переваги використання БПЛА	19
1.4 Виклики та обмеження сучасного використання	20
1.5 Загальна структура системи керування БПЛА.....	21
1.5.1 Апаратний рівень	21
1.5.2 Програмний рівень.....	22
1.5.3 Користувацький рівень.....	23
1.6 Типи каналів зв'язку та їх особливості	24
1.6.1 Радіоканал (RC).....	24
1.6.2 Wi-Fi	25
1.6.3 Телеметрія (433 MHz / 915 MHz)	26
1.6.4 LTE/4G/5G	27

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Григор'єв К. С.			Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі Пояснювальна записка	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Алєнін О. І.					1	
Реценз.						НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФІОТ, ІО-15		
Н. Контр.		Міщенко Л. Д.						
Затвердив								

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1	28
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ	30
2.1 Вибір апаратної платформи модуля.....	30
2.2 Контролер польоту.....	30
2.3 Обчислювальний модуль	35
2.4 4G-модем.....	38
2.5 Протокол взаємодії між компонентами	40
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2	41
РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТУВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО МОДУЛЯ КЕРУВАННЯ ЧЕРЕЗ 4G	43
3.1 Постановка задачі	43
3.2 Схема підключення компонентів	44
3.2.1 Живлення	44
3.2.2 Зв'язок між Pixhawk та Raspberry Pi	44
3.2.3 Підключення 4G модема	45
3.2.4 Додаткові підключення	446
3.2.5 Програмні інтерфейси	457
3.3 Конфігурація UART.....	49
3.4 Конфігурація Pixhawk для роботи з MAVLink через 4G	49
3.4.1 Оновлення прошивки	50
3.4.2 Налаштування параметрів MAVLink.....	50
3.4.3 Конфігурація потоків даних.....	50
3.5 Програмне забезпечення для обміну даними.....	51
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3	53
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ.....	54
4.1 Тестування системи.	54
4.2 Тестування скрипта.....	55

4.3 Аналіз стабільності та затримок зв'язку.....	57
4.4 Порівняння з традиційними методами керування.....	58
4.5 Рекомендації щодо розвитку та вдосконалення додатка.	59
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4	60
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА	Безпілотний літальний апарат
FPV	(First-person view) Керування від першого обличчя
GCS	(Ground control system) Наземна станція управління
UTM	(Universal Transverse Mercator) Конформаційна проєкція, яка використовує двовимірну Декартову систему координат, щоб задати координати місця розташування на поверхні Землі.
BEC	(Battery eliminator circuit) Блок виключення батареї
RPi	(Raspberry Pi) Одноплатний комп'ютер
QGC	(QGroundControl) Програма для керування різноманітними типами безпілотників

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У наш час застосування безпілотних літальних апаратів є уже поширеним явищем, їх використовують у багатьох різних галузях нашого життя - від сільського господарства до військової сфери. Через відносно низьку ціну та гнучкість використання БПЛА стало поширеним явищем для полегшення виконання завдань, які раніше були дуже важкими і потребували багато ресурсів.

Як бачимо, апарати подібного типу масово починають використовуватися в практично усіх сферах життя. Тому люди створили багато різних систем керування і ефективність та галузі застосування БПЛА повністю залежать від них. Традиційні способи управління мають різні обмеження, такі як радіус дії, вплив перешкод та інші. Наша система, яка працює на основі 4G мережі, має такі переваги: радіус керування, який залежить від покриття мережею, тобто практично необмежений, стабільний цифровий канал зв'язку, підтримка швидкісної передачі даних.

Метою даної дипломної роботи є дослідження системи керування БПЛА через 4G мережу та створення окремого модуля управління, який можна інтегрувати до існуючих або самозібраних дронів і забезпечує стабільне з'єднання з наземною станцією.

У роботі проводиться аналіз теоретичних та практичних аспектів керування БПЛА, включаючи основні принципи керування, засоби управління та існуючі інтелектуальні режими.

У роботі буде описано і проаналізовано різні способи управління дронами, та проведено порівняння їх ефективності у різних сферах, спроектовано прототип універсального модуля та його тестування.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА

1.1. Класифікація безпілотних літальних апаратів

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – це судно, управління якими здійснюється дистанційно без прямої участі пілота. Його керування здійснюються відповідною програмою або за допомогою спеціальної станції керування, що знаходиться по за повітряним судном, тобто дистанційно. Безпілотники стали неймовірно популярними і широко застосовуються майже у кожному куточку нашого життя.

Зараз відбувається стрімкий розвиток у будівництві БПЛА. Вони стають дешевшими, збільшують автономність, радіус дії, покращують точність виконання завдань, і розширюють коло свого застосування.

Їх класифікують за такими критеріями: тип системи управління, маса, масштаб завдань, паливна система, тип крила, тривалістю польоту, практична стеля польоту, тип літального апарату, базування, правила польотів, кількість використань, тип паливного баку, радіус дії, максимальна швидкість польоту, кількість двигунів, використання, спосіб злету та посадки, час одержання зібраної інформації. Далі буде детально описані деякі них.

1.1.1. Класифікація за типом системи управління.

За системою керування безпілотники поділяться на:

Дистанційно керовані управляються людиною під час виконання польоту. Команди від оператора можуть передаватися різними способами, такими як: радіоуправління, супутникові канали, Wi-fi, 4G мережі, вони будуть детально описані далі у роботі. У таких дронах багато критеріїв залежать від умінь та досвіду пілота, зліт, посадка та інші маневри виконуються людиною.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зазвичай безпілотники з таким типом системи керування застосовуються у фото та відеозйомках, оглядових польотах та FPV дронах, якими керує пілот за допомогою пульта та FPV-окулярів.



Рисунок. 1.1 – FPV дрон з дистанційно керованою системою управління.

Дистанційно пілотовані літальні апарати потребують серйозніших навичок та ресурсів для їх застосування. Для управління таким БПЛА порібно мати спеціалізованого пілота згідно з авіаційними нормами. Керується з наземної станції (GCS). Такі дрони допускаються до використання у спільному повітряному просторі з пілотованими літальними апаратами і мають дотримуватися правил цивільної авіації.

Прикладом таких БПЛА є військові безпілотники (наприклад MQ-9, Bayraktar), великі цивільні БПЛА (використовуються для метеоспостереження, доставки), можуть використовуватися у пошуково-рятувальних операціях.

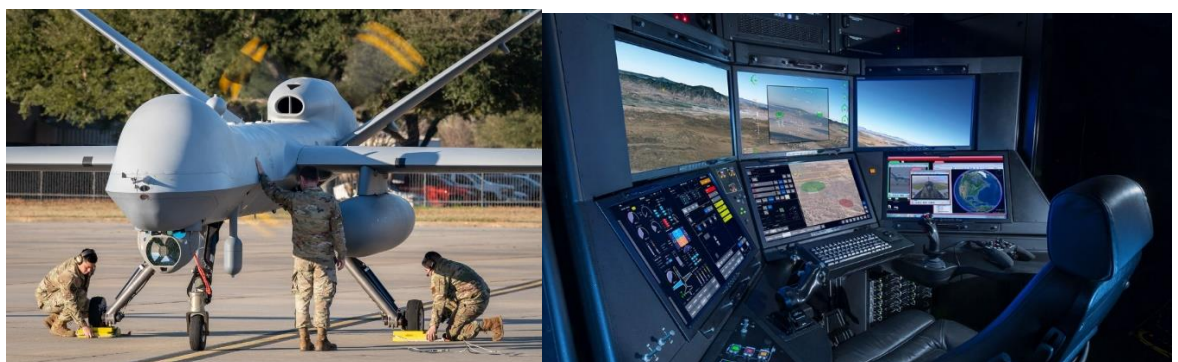


Рисунок. 1.2 – MQ-9 та наземна станція керування (GCS).

Автоматичні працюють без участі людини у керуванні, вони виконують заранне запрограмовані завдання. Орієнтуються за допомогою вбудованої навігації, має сенсори для уникнення перешкод, можуть використовувати штучний інтелект для вибору оптимального маршруту, ухилення від перешкод, адаптації до змін середовища.

Застосовується у аграрній сфері: агромоніторинг, обробка полів, екологічний моніторинг і ін.



Рисунок. 1.3 – DJI Agras T40 – дрон для обробки полів.

Дистанційно керовані авіаційною системою безпілотники виконують завдання напівавтоматично, керування відбувається через UTM-системи. Ці системи розподіляють маршрути, контролюють швидкість, висоту. Працюють у спільному повітряному просторі з пілотованими літальними апаратами та іншими дронами UTM-системи запобігають конфліктам у повітрі.

Широко використовуються у масштабних системах доставки, інфраструктурному моніторингу, повітряному таксі.



Рисунок. 1.4 – Volocopter VoloCity– безпілотне повітряне таксі.

1.1.2. Класифікація за часом одержання зібраної інформації.

У масштабі реального часу дані передаються з мінімальною затримкою. Пересилання інформації відбувається за допомогою радіоканалу, супутникового зв'язку або мобільної мережі. Дані одразу приходять на сервер або наземну станцію.

Застосовується цей спосіб, коли потрібна миттєва передача даних оператору або серверу. Найчастіше у пошуково-рятувальних, військових операціях, патрулюванні об'єктів.

Періодично в ході сеансів зв'язку дані передаються пакетами під час спеціальних сеансів зв'язку. Інформація може передаватися за певним графіком або подає сигнал при фіксуванні певної події датчиками. Наприклад дрон може виявити незвичну температуру повітря і відправити інформацію для перевіри людиною.

Використовуються у аграрному секторі, наприклад передають інформацію після виконання певної дії, метеорологічні безпілотники, або БПЛА у зонах з обмеженим покриттям, відправляє дані тільки при досягненні зони сигналу.

Дані можуть зберігатися локально на накопичувачі який розміщено на самому дроні, тому отримати їх можна тільки після його посадки. Це найдешевший і найбільш енергоефективний спосіб.

Часто цей спосіб використовується у картографії, наукових дослідженнях, інспекції об'єктів інфраструктури. Коли потрібно зібрати величезну кількість інформації, про не оператору не потрібно отримувати дані у реальному часі.

1.1.3. Класифікація за типом літального апарату.

Аеростатичні (легші за повітря) тримаються у повітрі завдяки газу легшому за повітря. Не мають крил або гвинта. Зазвичай вони статичні або мають дуже малу швидкість. Часто використовуються для спостереження за великою територією протягом довгого часу, або як повітряні станції зв'язку (для передачі сигналів на великі відстані).



Рисунок. 1.5 – Безпілотник з аеростатичним типом літального апарату.

За літаковою аеродинамічною схемою дрони мають схожу конструкцію до літаків. Мають звичайні крила, зліт відбувається під час розгону або завдяки катапульті, такі безпілотники не можуть зависати на одному місці. Вони використовуються у військових місіях, картографії, моніторингу великих площ або інших завдань на великій дистанції.



Рисунок. 1.6 – Безпілотник за літаковим типом літального апарату

БПЛА з гелікоптерною аеродинамічною схемою, мають таку ж побудову як вертольоти, а саме зліт відбувається через обертання гвинта, або гвинтів. Такі безпілотники можуть зависати у повітрі, або використовуватися у закритому просторі. Ці дрони найбільше використовуються у цивільних цілях, для відеозйомки, або у агросекторі.



Рисунок. 1.7 – Безпілотник за гелікоптерним типом літального апарату

1.1.4. Класифікація за масою.

БПЛА за масою розподіляються у залежності від загальної злітної ваги. Від цього залежить дальність польоту, вантажність та навіть управління.

Малорозмірні – це дрони до 2кг. Застосовуються для відеозйомки, використання у малих приміщеннях або як навчальні. Зазвичай це безпілотники у відкритому доступі, які може дозволити собі звичайна людина.

Середньорозмірні – це 2-25 кг. Це найпоширеніший клас серед професійних БПЛА, через свою збалансованість у дальності та часу польоту, вантажності і зручності використання.

Великорозмірні мають вагу від 25-150 кг. Вони вимагають спеціальних дозволів для використання та досвідченого пілота. Це уже професійні системи, які використовуються у різних сферах, від військової до сільськогосподарської.

Важкі БПЛА вважаються ті які мають вагу понад 150 кг. Це повноцінні авіаційні комплекси, які повинні бути сертифіковані як повітряне судно. Теж застосовуються у військових або логістичних місіях, оскільки мають велику вантажопідйомність.

1.1.5. Класифікація за радіусом дії

Ця класифікація розділяються по відстані на яку безпілотники можуть відлетіти від оператора або бази управління без втрати зв'язку.

Таблиця 1.1. – Радіус дії БПЛА

Категорія	Радіус дії
Ближнього радіусу	До 5 км
Малого радіусу	5-30 км
Середнього радіусу	30-200 км
Дальнього радіусу	200-500 км
Великої дальності польоту	Понад 500 км

1.2. Сфери застосування БПЛА

Безпілотні літальні апарати – це універсальний інструмент, що застосовується у різних галузях. Від цивільних місій до військових операцій. У цьому розділі ми детально розглянемо у яких сферах і як застосовуються БПЛА.

Аналіз ключових напрямів застосування БПЛА дозволить зрозуміти, як ці технології трансформують традиційні підходи до вирішення складних задач, підвищують ефективність та відкривають нові можливості для суспільства.

1.2.1. Військова справа.

БПЛА стали дуже поширеним інструментом у військовій сфері і є ключовим фактором на сучасному полі бою. Їх застосування можна поділити на такі категорії:

- 1) Розвідка. Основна функція це виявлення противника, ворожих позицій, переміщення або оцінки місцевості без ризику для людини. БПЛА ведуть відеоспостереження і передають його у прямому ефірі оператору. Можуть оснащатися різними видами камер і датчиків у залежності від умов застосування.
- 2) Коригування вогню. Їх метою є виявлення та точне наведення артилерії на ворога. Вони повинні передавати точні координати і мати низьку затримку передачі даних.
- 3) Ударні дрони. Завдання таких дронів є ураження ворога, техніки або стратегічних об'єктів. Такі безпілотники поділяються на:
 - Дрони-камікадзе – одноразові, уражає ціль шляхом підривання при зіткненні (Switchblade, Shahed-136).



Рисунок. 1.9 – Дрон-камікадзе - Switchblade

- Коптери з функцією скидання заряду. Можуть бути звичайними цивільними дронами з допрацьованою функцією кріплення і скидання боєзаряду.



Рисунок. 1.10 – Дрон зі скидом заряду

- FPV-дрони. Стали дуже дешевою і смертоносною зброєю. Через їх ціну і ефективність застосовуються для знищення техніки і живої сили ворога.



Рисунок. 1.11 – Військовий FPV-дрон

- 4) РЕБ. Дрони оснащують передавачами РЕБ, для приглушення зв'язку, мобільного інтернету, GPS, Wi-Fi та інших ворожих сигналів.



Рисунок. 1.11 – Портативна станція РЕБ

- 5) Логістика. БПЛА використовуються для доставки різних вантажів у важкодоступні місця, це може бути, як їжа так і медикаменти або боєприпаси. Також можуть використовуватися для евакуації.



Рисунок. 1.12 – БПЛА для транспортування вантажів.

- 6) Можуть використовуватися для протидії ворожим безпілотникам. Застосовують сітки, глушать або перехоплюють управління, або знищують ворожий дрон.



Рисунок. 1.13 – Дрон перехоплювач з сіткою

1.2.2. Аграрний сектор.

Сучасне сільське господарство все частіше звертається до інноваційних технологій для підвищення ефективності виробництва, зменшення витрат та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Однією з найперспективніших розробок у цій галузі стало використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які відкривають нові можливості для точного землеробства, моніторингу посівів, обробки ґрунтів та аналізу стану рослин.

- 1) Моніторинг посівів. Метою є виявлення рослин вражених хворобою, шкідниками, знаходження зон посухи, дефіциту добрив, загальне спостереження за посівами.
- 2) За допомогою безпілотників відбувається посів полів, або розкидання мікродобрив та інших препаратів. Використовуються у важкодоступних ділянках, таких як гори, схили, узбіччя.
- 3) Застосовуються для обприскування полів добривами, гербіцидами, інсектицидами. Такий спосіб має досить високу точність обробки, рівномірність якої можна задати програмно. Перевагами застосування безпілотників у обприскуванні можна назвати меншу витрату

препаратів, зменшення тику на ґрунт, оскільки не потрібно заїжджати на поле, та можливість працювати у автоматичному режимі.

- 4) БПЛА використовуються для створення карт полів та оцінки їх врожайності. Вони збирають фотодані, обробляють цифрові моделі рельєфу, допомагають у плануванні зрошення. За допомогою зібраних даних про площі, щільність посівів можуть прогнозувати урожайність поля.

1.2.3. Геодезія та картографія.

БПЛА є також і важливим інструментом у геодезії та картографії, через свою мобільність, високу точність даних та дешевизні. Вони дають можливість детально досліджувати місцевість, створювати цифрові моделі рельєфу та місцевості, спостерігати за об'єктами у прямому ефірі та створювати топографічні карти.

- 1) Безпілотники оснащуються датчиками, камерами, лідарами, за допомогою яких проводиться аерозйомка хорошої якості. Далі ці дані обробляються спеціальними програмами, так створюються ортофотоплани.
- 2) Дякуючи лідарам, після сканування можна отримати цифрові моделі рельєфу та місцевості (ЦМР, ЦММ). Які застосовуються у проєктуванні, пошуку зсувів, ерозії ґрунтів.
- 3) Через свою мобільність дрони допомагають створювати і оновлювати карти у реальному часі, що може бути дуже корисно у наприклад зонах стихійних лих.

Основними перевагами є застосування БПЛА у важкодоступних місцях, можливість створення 3D-моделей, вартість. Недоліки ж це енергоефективність та вплив погодніх умов.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Безпілотники стали точним, швидким і вигідним інструментом у геодезії та картографії. Застосування таких систем підвищило ефективність і зручність роботи у цій сфері.

1.2.4. Моніторинг інфраструктури

У сфері моніторингу інфраструктури також почали активно використовуватися БПЛА. Вони дозволяють швидко отримувати інформацію про стан трубопроводів, ЛЕП, мостів та будинків, це дозволило зменшити вартість таких обстежень, і підвищити їхню якість.

Безпілотники застосовуються для перевірки стану залізниць, автомобільних доріг.

Дозволяють проводити інспекцію енергетичної інфраструктури. На дистанції можна виявити обриви, пошкодження проводів на лініях електропередач (ЛЕП). Перевірити стан вітрових або сонячних електростанцій. Отримати доступ для інспекції підстанцій у важкодоступних місцях. БПЛА дозволяють зменшити ризик для людей шляхом зменшення прямих контактів при перевірці обладнання.

За допомогою дронів здійснюється контролювання будівництва, промислових підприємств, інспекція дамб та гребель.

Здійснюється виявлення витоків у трубопроводах, контролюється цілісність конструкцій нафтоємностей.

БПЛА є незамінним способом для моніторингу інфраструктури, через безпечність і точність збору даних. Застосування безпілотників у цій сфері покращили ефективність і швидкість виявлення проблем, і дозволили запобігти аваріям.

1.2.5. Рятувальні операції.

У сучасних рятувальних операціях частіше почали залучати БПЛА для пошуку постраждалих, координації рятувальників, допомоги у екстрених ситуаціях. Завдяки своїй швидкості, зручності використання, маневреності та кастомізації безпілотики стали одним із основних інструментів ліквідації наслідків пожеж, стихійних лих та інших надзвичайних подій.

Безпілотики застосовуються при пошуково-рятувальних операціях. Вони служать для пошуку зниклих осіб, раніше постраждалих від катастрофи, доставка їжі, ліків та медичного обладнання у важкодоступні місця.

Дрони - цінний інструмент для ліквідації лісових пожеж, повенів, землетрусів та інших природніх лих. Тепловізори дають можливість ідентифікувати осередки пожежі, знаходити людей у воді та під завалами. БПЛА - це зручний спосіб координування рятувальників та пожежників.

На місці техногенних аварій також застосовують БПЛА для визначення місць витоків небезпечних речовин, огляду місця катастрофи, пошуку постраждалих та оцінки ситуації.

З початку використання безпілотників у рятувальних операціях їхня ефективність підвищилася. Через швидко отриману інформацію рятувальники змогли врятувати багато людей, яких було б важко знайти без застосування цієї технології.

1.3. Переваги використання БПЛА.

У порівнянні з традиційними інструментами, БПЛА має суттєві переваги у всіх сферах свого застосування:

- 1) Висока ефективність. Безпілотики дозволяють прискорити виконання завдання завдяки скануванню і зйомки великої території за короткий час.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виконання деяких місій може бути автоматизоване, і не потребувати людей для його виконання, що може підвищити точність результатів.

- 2) Матеріальна вигода. БПЛА є дешевим інструментом у порівнянні з іншими. Їх вигідніше обслуговувати і застосовувати, оскільки деталі можуть мати низьку вартість, а використання потребує значно менше ресурсів за пілотовані системи.
- 3) Мінімізація ризиків і зменшення людського фактору. Безпілотні технології дозволяють скорочення використання живої сили у небезпечних місцях, таких як зони з хімічною небезпекою, великі висоти. Дозволяють виконувати завдання у важкодоступних місцях або у зонах де небезпечно знаходитися людині.
- 4) Висока точність та гнучкість. Дякуючи сучасним технологіям ми можемо отримувати високоякісні знімки, відео, лідарне сканування, дані тепловізорів і оброблювати їх у реальному часі. У залежності від виду безпілотників, вони можуть бути запущені надзвичайно швидко і при різних умовах. БПЛА є універсальним інструментом, завдяки своїй конструкції, їх можна налаштувати під різні сфери застосування.

1.4. Виклики та обмеження сучасного використання БПЛА.

Проте безпілотні системи можуть мати і недоліки та обмеження:

- 1) Головним викликом сучасних БПЛА є час польоту, оскільки він залежить від ємності акумуляторів, що у свою чергу впливає на вантажопідйомність. При цьому при збільшенні ваги збільшується і енергоефективність.
- 2) Безпілотники сильно залежать від погодних умов, таких як вітер, дощ, високі або низькі температури та інші незгоди.
- 3) У недоліки також можна додати вартість, оскільки хоч у деяких випадках це вигідно, професійні апарати можуть коштувати дуже

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дорого, і перехід зі звичного обладнання на безпілотні системи може потребувати багато ресурсів.

- 4) З різким підвищенням популярності БПЛА, з'явилися проблеми у правовій структурі, оскільки часто відсутні чіткі закони і правила застосування безпілотників.

Незважаючи на ці проблеми, сфера безпілотних систем стрімко розвивається і багато з цих проблем може зникнути у майбутньому і з'являться нові.

1.5. Загальна структура системи керування БПЛА

Система управління БПЛА – це великий комплекс технічних та програмних засобів. За їх допомоги можна досягти стабільних автономних або керованих польотів, здійснювати навігацію, передавати дані та виконувати інші задані місії. Сам комплекс складається з декількох підсистем, які взаємодіють між собою.

1.5.1. Апаратний рівень.

Цей рівень відповідає за всі фізичні компоненти БПЛА. Без них безпілотник не зможе працювати, або виконувати якісь завдання. Оскільки, ці пристрої забезпечують роботу дронів у реальному середовищі.

Починається усе з рамки БПЛА, це основний і несучий елемент конструкції квадрокоптера, до якого кріпляться всі інші комплектуючі. Рама складається з двох частин: фюзеляж та промені

- Фюзеляж необхідний розміщення електроніки, наприклад, польотного контролера чи камери. Зазвичай центральна

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частина складається з двох пластин, нижньої та верхньої, з'єднаних стійками.

- Промені потрібні для встановлення моторів та регуляторів.

Основною причиною руху є двигуни і ESC. Вони забезпечують рух гвинтів, які перетворюють обертальний момент двигуна в тягу.

Далі ідуть складніші системи, одною з яких є бортовий комп'ютер. Він відповідає за основні функції керування, обробки даних, передачі їх та зв'язок з операторам.

Польотний контролер – це один з найважливіших компонентів дрона. Він відповідає за стабілізацію дрона, забезпечення точних маневрів і надання даних пілоту. Контролер польоту - це як мозок безпілотної. Це плата, оснащена датчиками, які визначають рухи дрона та команди користувача. Маючи цю інформацію, він регулює швидкість двигунів, щоб перемістити дрон у потрібному напрямку.

Всі польотні контролери мають основні датчики, такі як гіроскопи і акселерометри, в той час як інші можуть включати інші датчики, такі як датчики барометричного тиску (барометр) і компаси (магнітометр).

Також додатково можна встановити інші сенсори, такі як лідарні датчики, камери, мікрофони, динаміки. Це залежить від завдання цього безпілотної.

І звісно для забезпечення роботи БПЛА потрібне живлення. У основному вистачає звичайної батареї та модуля моніторингу напруги і струму.

1.5.2. Програмний рівень.

- Модуль телеметрії. Телеметрія це спеціалізована система збору та передачі даних про стан безпілотної апарату в режимі реального часу. Телеметрія БПЛА включає комплекс датчиків та передавачів, які забезпечують

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оператора критично важливою інформацією про параметри польоту, стан систем та технічні показники дрона під час його експлуатації.

- Модуль автономної навігації. Це алгоритм який відповідає за побудову маршрутів, уникнення перешкод та ін.
- Модуль комп'ютерного зору. Комп'ютерний зір або Комп'ютерне бачення — теорія та технологія створення машин, які можуть проводити виявлення, відстежування та визначення об'єктів. Реалізує обробку відео з камери в реальному часі, використовується для виявлення об'єктів, трасування, цілевказання.
- Система логування та моніторингу. Спостерігає за польотом, відслідковує і передає дані про помилки та інші події.
- Протоколи взаємодії: MAVLink, UDP/TCP, SSH для віддаленого доступу та програмного керування.

1.5.3. Користувацький рівень.

Цей рівень включає наземні та мережеві інтерфейси, через які оператор чи система управління контролює БПЛА.

Наземна станція:

- Пульти керування / GCS (Ground Control Station): Наприклад, QGroundControl, Mission Planner або кастомні веб-інтерфейси.
- Інтерфейс управління польотом: Карта маршруту, інформація про телеметрію, команди зльоту/посадки, побудова місії.
- Моніторинг відео: Пряма трансляція з камери (RTSP/WebRTC/HTTP Live Streaming).
- Аналітична панель: Вивід діагностики, статус батареї, швидкості, положення в просторі.

Мережеві сервіси:

- Хмарні сховища: Для збереження телеметрії, відео та місії.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Інтерфейси API: REST або WebSocket для інтеграції з зовнішніми системами (наприклад, бойовими командними центрами).
- Системи безпеки: Шифрування каналів, автентифікація, контроль доступу.

Система керування БПЛА – це складний комплекс, що поєднує апаратне забезпечення, програмні алгоритми та канали зв'язку. Взаємодія між апаратною частиною, програмними модулями та користувацькими інтерфейсами дозволяє реалізовувати як ручне керування, так і автономне.

1.6. Типи каналів зв'язку та їх особливості

1.6.1. Радіоканал (RC).

Радіоканал – це найпоширеніший спосіб зв'язку для управління БПЛА, зазвичай використовується для ручного керування пілотом. Базується на радіочастотному з'єднанні між передавачем і приймачем.

Таблиця 1.2. – Основні характеристики радіоканалу

Параметр	Значення
Частотні діапазони	2.4 GHz, 5.8 GHz, 433 MHz, 915 MHz
Дальність дії	Від 500 м до 5+ км
Затримка	~5–50 мс (залежно від протоколу)
Режим зв'язку	Односторонній (передача команд)

Переваги RC-зв'язку:

- Низька затримка
- Надійність
- Низьке енергоспоживання
- Простота і доступність

Недоліки RC-зв'язку:

- Малий радіус дії
- Вразливість до перехоплення
- Односторонній канал
- Вразливість до перешкод

Радіоканал уже став базовим механізмом керування БПЛА, і який найбільше підходить для управління у ручному режимі через низьку затримку. Через його доступність, стабільність, малу затримку він є дуже зручним способом для базових потреб, проте через свої недоліки, є мало корисним для виконання складніших місій.

1.6.2. Wi-Fi

Wi-Fi – це спосіб зв'язку для локального бездротового обміну даними між БПЛА та наземною станцією. Зазвичай його використовують для керування безпілотником на малій відстані, або взагалі тільки для налаштування дрона і передачі різних даних, таких як фото, відео, телеметрія.

Таблиця 1.3. – Основні характеристики Wi-Fi

Параметр	Значення
Частотні діапазони	2.4 GHz, 5 GHz
Дальність дії	Від 50 м до 150 м
Затримка	~10–50 мс (залежно від навантаження мережі)
Режим зв'язку	Двосторонній

Переваги Wi-Fi:

- Швидкість передачі даних
- Двосторонній зв'язок
- Низьке енергоспоживання

Недоліки Wi-Fi:

- Малий радіус дії
- Нестабільність зв'язку
- Високе енергоспоживання

Wi-Fi є корисним каналом для передачі різкого виду даних, проте для керування БПЛА поза домашніх умов є поганим рішенням. Його можна використовувати як допоміжний канал, для швидкого отримання і передачі інформації.

1.6.3. Телеметрія (433 MHz / 915 MHz)

Керування телеметрією БПЛА – це процес відстеження та управління параметрами польоту безпілотного літального апарату (БПЛА) за допомогою телеметричних систем. Використовується для двостороннього обміну даними між автопілотом БПЛА та наземною станцією. Не застосовується для ручного керування.

Таблиця 1.4. – Основні характеристики телеметрії

Параметр	Значення
Частотні діапазони	433 MHz (EU), 915 MHz (US), 868 MHz
Дальність дії	1–5 км, до 20+ км з підсилювачами
Режим зв'язку	Двосторонній

Переваги телеметрії:

- Великий радіус дії
- Незалежність від інтернету
- Двосторонній зв'язок
- Низьке енергоспоживання

Недоліки телеметрії:

- Затримка
- Ліцензування частот
- Потребує додаткових налаштувань антен

Телеметрія є дуже корисним каналом зв'язку для віддаленого керування БПЛА, а точніше місіями заданими для БПЛА, оскільки за допомогою нього не можна використовувати ручне управління, проте він є ідеальним інструментом у зв'язці з автопілотом.

1.6.4. LTE/4G/5G

LTE/4G/5G-зв'язок – це мобільні технології, які забезпечують швидкісний зв'язок між БПЛА та наземною станцією у межах покриття. Це один з найкращих способів керування для завдань з великим радіусом дії, часто можна застосовувати у дальніх недоступних районах.

Таблиця 1.5. – Основні характеристики мобільного зв'язку

Параметр	4G	5G
Пропускна здатність	до 100 Мбіт/с	до 1–10 Гбіт/с
Дальність дії	У межах покриття мобільної мережі	
Затримка	~30–80 мс	~30–80 мс

Переваги мобільного зв'язку:

- Дуже великий радіус дії
- Висока пропускна здатність
- Мала затримка
- IP-інтеграція

Недоліки мобільного зв'язку:

- Залежність від покриття мобільної мережі
- Потреба у SIM-карті
- Вразливість до перешкод
- Вразливість до глушіння

LTE/4G/5G є найпотужнішим типом каналу зв'язку для БПЛА. Це ідеальний спосіб керування на великій дистанції і швидкого обміну даними, ще великою перевагою є можливість інтеграції з хмарними системами. Швидкими темпами вирішується основний недолік цієї системи, оскільки з кожним днем покриття мобільних мереж покращується.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1

Проаналізувавши різні види БПЛА і сфери їх застосування, можна зрозуміти, що вони стали незамінним, універсальним інструментом у багатьох галузях, і широко використовуються у військових місіях, аграрному секторі, картографії, геодезії та рятувальних операціях, що свідчить про їхню ефективність.

Основними перевагами залишається:

- Швидкість виконання завдань.
- Дистанціювання людини від місця виконання завдання.
- Точність отриманої інформації.
- Гнучкість через свою модульну структуру.

Основними ж недоліками є:

- Технічні обмеження.
- Матеріальна частина професійних систем.
- Розвиток правової системи у сфері безпілотників.

Також оглянуто різні системи керування БПЛА. Вибір типу каналу зв'язку є важливим для стабільної передачі даних між безпілотником і оператором. Радіоканал (RC) підходить для коротких дистанцій і простого керування, Wi-Fi забезпечує високошвидкісний зв'язок на обмеженій відстані, телеметрія на частотах 915 MHz або 433 MHz використовується для стабільного зв'язку на середніх відстанях, а LTE/4G/5G дозволяє організувати контроль дрона на великих відстанях.

Отже, БПЛА стали невід'ємною частиною сучасних технологічних рішень, і за розвитком цієї сфери стоїть майбутнє. З вирішенням основних проблем застосування дронів розшириться і стане незамінним інструментом.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ

2.1. Вибір апаратної платформи модуля.

Для успішної реалізації нашого проєкту системи керування БПЛА через 4G мережу потрібно підібрати надійні апаратні компоненти, які будуть здатні забезпечити надійний, безперервний зв'язок між безпілотником та оператором у реальному часі. Важливу роль у цьому відіграють наші компоненти, що відповідають за обробку інформації, підтримку телеметрії, запуск мережевих служб, взаємодію з автопілотом і зовнішніми модулями.

У цьому розділі будуть показані та описані вибрані елементи для нашої системи, такі як обчислювальний модуль, контролер польоту та 4G-модем. Розглянемо технічні характеристики та ролі у побудові універсального модуля керування.

2.2. Контролер польоту

Польотний контролер - центральний компонент безпілотника, який відповідає за обробку даних з різних сенсорів та команд пілота. Він відповідає за стабілізацію, керування польотом та координацію всіх бортових систем. Контролери польоту можуть бути оснащеними вказаними нижче сенсорами, але також можуть включати їхню комбінацію в залежності від виду контролера і потреби користувача.

– Акселерометр: вимірюють лінійне прискорення за трьома осями. Для визначення положення акселерометр повинен бути встановлений на контролері польоту так, щоб лінійні осі збігалися з основними осями безпілотника.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Гіроскоп: Гіроскоп вимірює швидкість зміни кутів за трьома кутовими осями. Зазвичай вимірюється у градусах за секунду. У основному всі дані, що надходять, обробляються кодом контролера польоту. Гіроскоп повинен бути встановлений так, щоб осі його обертання збігалися з осями БПЛА.

– Інерційний вимірювальний блок (IMU): IMU - по суті, це невелика плата, яка містить як акселерометр, так і гіроскоп. Більшість з них включають трьохосовий акселерометр і трьохосовий гіроскоп, інші можуть включати додаткові сенсори..

– Магнітометр: Електронний магнітний компас здатний визначати магнітне поле Землі та використовувати ці дані для визначення напрямку компаса безпілотної. Якщо система має GPS вхід і доступно від однієї до трьох осей, то цей сенсор майже завжди присутній.

– Барометр: Оскільки атмосферний тиск змінюється при віддаленні від рівня моря, можна використовувати сенсор тиску, щоб отримати досить точні показання висоти БПЛА. Для розрахунку максимально точної висоти більшість контролерів польоту отримують дані одночасно від сенсора тиску і супутникової системи навігації (GPS).

– GPS: Система глобального позиціонування (GPS), щоб визначити своє конкретне географічне розташування, використовує сигнали, що посиляються кількома супутниками, що звертаються по орбіті навколо Землі. Контролер польоту може мати як вбудований GPS модуль, так і підключається за допомогою кабелю. Щоб отримати точні дані розташування, модуль GPS повинен приймати дані від кількох супутників, і чим більше, тим краще.

– Відстань: Датчики відстані все частіше використовуються на безпілотної, оскільки GPS-координати та датчики тиску не можуть розповісти вам, наскільки далеко ви знаходитесь від землі, чи зіткнетеся ви з об'єктом чи ні. Датчик відстані, звернений вниз, може працювати на базі на ультразвукових, лазерних або лідарних технологій.

На основі інформації з датчиків контролер здійснює регулювання швидкості обертання двигунів, відповідає за координацію, стабілізацію та керування дрону.

Основними завданнями контролера є:

- збір даних із датчиків;
- розрахунок свого становища у просторі;
- отримання команд з пульта управління ;
- відправка керуючих сигналів на регулятори обертів (ESC);
- утримання на заданій висоті;
- автоматичний політ по заданому маршруту;
- зупинка чи обліт перешкод;
- автоматична посадка при повній втраті живлення

Польотні контролери – це серце будь-якого дрона, і правильний вибір цього компонента критично важливий для успішних польотів. Без якісного польотного контролера неможливо досягти точного та плавного польоту.

Для нашої системи було вибрано Pixhawk 4, як основний автопілот.



Рисунок. 2.1 – Pixhawk 4

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Pixhawk 4 — це вдосконалений автопілот, розроблений та створений у співпраці з Holybro та командою PX4. Він оптимізований для роботи з PX4 версії 1.7 та вище і підходить як для академічних, так і для комерційних розробників.

Основні характеристики:

- 1) Головний FMU процесор: STM32F765
- 2) Процесор вводу-виводу (IO): STM32F100
- 3) На борту має такі датчики:
 - Акселератор/гіроскоп: ICM-20689
 - Акселератор/гіроскоп: BMI055 або ICM20602
 - Магнітометр: IST8310
 - Барометр: MS5611
- 4) GPS:
 - GPS/GLONASS приймач u-blox Neo-M8N
 - вбудований магнітометр IST8310
- 5) Інтерфейси:
 - 8-16 ШІМ-виходів (8 із ІО, 8 із FMU)
 - 3 виділених ШІМ/захоплення входи на FMU
 - Спеціальний вхід для дистанційного керування (RC) для CPPM
 - Виділений вхід для пульта дистанційного керування Spektrum / DSM та S.Bus з аналоговим/ШІМ входом RSSI
 - Спеціалізований S.BUS вивід сервоприводу
 - 5 портів загального призначення
 - 3 I2C порти
 - 4 шини SPI
 - До 2 CANBus для подвійного CAN з послідовним ESC
 - Аналогові входи для напруги/струму з 2 акумуляторів
- 6) Система живлення:
 - Вихідна напруга модуля живлення: 4.9~5.5 В

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

- Вхід USB Power: 4.75~5.25 В
 - Вхід серворейки: 0~36 В
- 7) Вага та розміри:
- Вага: 15.8g
 - Розміри: 44x84x12мм

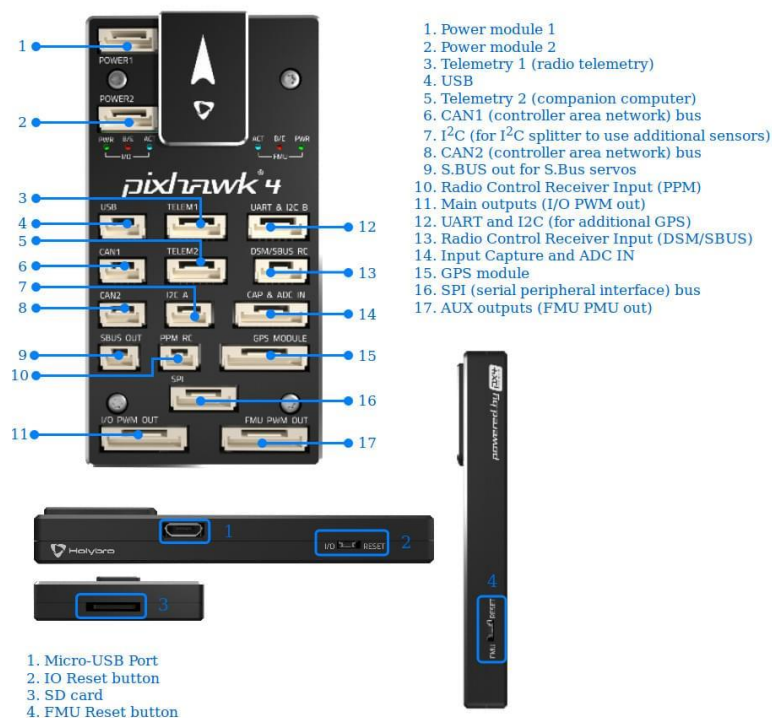


Рисунок. 2.2 – Інтерфейси/роз'єми Pixhawk 4

Основні причини вибору Pixhawk 4 для нашого проєкту:

- 1) Висока надійність та стабільність. Pixhawk 4 розроблений для критично важливих застосувань, має подвійний процесор (STM32F765 + STM32F100) і резервування систем. Підтримує fail-safe та автоматичне відновлення після збоїв.
- 2) Потужне програмне забезпечення. Повна сумісність з відкритими автопілотами PX4 і ArduPilot, що надає гнучкість у налаштуванні та широкий функціонал.
- 3) Модульність. Має велику кількість інтерфейсів/роз'ємів для підключення необхідної периферії та сенсорів.

4) Висока продуктивність. Оснащений потужним процесором STM32F765 з достатньою кількістю пам'яті для розширених місій.

5) Екосистема та спільнота. Має велику кількість готових компонентів і аксесуарів на ринку. Широка підтримка спільноти, документація, пошук інформації.

6) Доступність. У порівнянні з аналогами має хороше співвідношення ціни і якості.

2.3. Обчислювальний модуль.

Обчислювальний модуль БПЛА - це пристрій, який обробляє дані з сенсорів, телеметрії, виконує складні обчислення та напряду взаємодіє з автопілотом та наземною станцією. Цей модуль можна назвати посередником між польотним контролером та зовнішнім світом.

Основними завданнями обчислювального модуля є:

1) Обробка телеметрії. Збір і передача даних до нашого Pixhawk 4 та їх аналізування.

2) Обробка даних з датчиків. Камери, GPS, лідарні дані.

3) Зв'язок. Забезпечує підключення до інтернету, через модем. Забезпечення VPN, тунелю для захищеного з'єднання з наземною станцією.

4) Керування зовнішніми пристроями.

Обчислювальний модуль — один з основних елементів сучасного БПЛА, він забезпечує можливість розширення функціоналу, мережеву інтеграцію. Саме завдяки йому можливе керування через 4G, автономні сценарії, комп'ютерний зір і використання штучного інтелекту на борту.

Для нашої системи було вибрано Raspberry Pi 4 Model B, як обчислювальний модуль.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок. 2.3 – Raspberry Pi 4 Model B

Raspberry Pi — одноплатний комп'ютер, побудований на SoC Broadcom BCM2711, яка включає в себе процесор ARM, графічний процесор, і 1, 2, 4 чи 8 гігабайтів оперативної пам'яті. Жорсткий диск відсутній, натомість використовується SD карта. Комп'ютер планувався як пристрій для навчання дітей програмуванню, однак здобув популярність і в інших сферах.

Основні характеристики:

- 1) Процесор: Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.8GHz
- 2) Оперативна пам'ять: 1GB/2GB/4GB/8GB LPDDR4-3200 SDRAM
- 3) Інтерфейси:
2.4 GHz and 5.0 GHz IEEE 802.11ac wireless, Bluetooth 5.0, BLE
 - Gigabit Ethernet
 - 2 USB 3.0 ports
 - 2 USB 2.0 ports
 - Raspberry Pi standard 40 pin GPIO header (fully backwards compatible with previous boards)
 - 2 × micro-HDMI® ports (up to 4kp60 supported)
 - 2-lane MIPI DSI display port

- 2-lane MIPI CSI camera port
- 4-pole stereo audio and composite video port
- 4) Підтримка мультимедіа:
 - H.265 (4kp60 decode)
 - H264 (1080p60 decode, 1080p30 encode)
 - OpenGL ES 3.1
- 5) Живлення:
 - 5V DC via USB-C connector (minimum 3A*)
 - 5V DC via GPIO header (minimum 3A*)
 - Power over Ethernet (PoE) enabled (requires separate PoE HAT)

Основні причини вибору Raspberry Pi 4 для нашого проекту:

- 1) Висока продуктивність. Процесор та оперативна пам'ять дозволяють в високою ефективністю обробляти інформацію та працювати зі складними алгоритмами.
- 2) Універсальність. Дозволяє використовуватися з іншими системами, має високу сумісність з Rixhawk. Підтримує різні операційні системи, що є зручним доповненням.
- 3) Підтримка 4G-модемів. Має повноцінні порти для підключення модемів. Дає можливість налаштування VPN, SSH, доступу до наземної станції через інтернет.
- 4) Екосистема та спільнота. Raspberry Pi має одну з найбільших спільнот у світі вбудованих систем. Існує безліч інструкцій, бібліотек та прикладів.
- 5) Енергоспоживання. Легко живиться від системи живлення БПЛА
- 6) Компактність.

Raspberry Pi 4 — це оптимальний вибір для побудови 4G-модуля керування БПЛА, оскільки поєднує в собі потужність, компактність, гнучкість

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та повністю сумісний з Pihawk. Має не велику вартість, що є приємним бонусом.

2.4. 4G-модем.

4G модем - це компактний пристрій передачі даних, покликаний забезпечити доступом до інтернету один або кілька пристроїв (ноутбук, стаціонарний ПК, смартфон, планшет, телевізор, ігрову приставку тощо) через мережі мобільних операторів.

При виборі 4G модему потрібно звернути увагу на частоти LTE, що підтримуються. В Україні мережі 4G розгорнуті операторами Київстар, Vodafone Ukraine та Lifecell на двох частотах – LTE FDD 1800 МГц та 2600 МГц. Виходячи з місця розташування, покриття мереж операторів та поставлених завдань потрібно підбирати 4G модем, де б була присутня та чи інша частота, а краще обидві.

Для нашої системи було вибрано HUAWEI E3372, як 4G-модем.



Рисунок. 2.3 – HUAWEI E3372

Huawei E3372 – компактний USB модем з підтримкою 3G/4G технологій. Забезпечує високу швидкість передачі даних, хороший прийом сигналу та простоту використання. Підтримує частоти LTE 900/1800/2100/2600 МГц, сумісний з багатьма роутерами. При необхідності доступна самостійна зміна

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прошивки на модифіковану. Працює з SIM-картками будь-яких мобільних операторів як в Україні, так і за кордоном.

Основні характеристики:

- 1) Тип пристрою: USB модем
- 2) Стандарт зв'язку: 4G LTE, 3G, 2G
- 3) Підтримка ОС : Windows 10, Windows 8/8.1, Windows 7, Windows XP, Mac OS, Linux
- 4) Частоти та технології 4G LTE: 800 МГц, 4G LTE: 900 МГц, 4G LTE: 1800 МГц, 4G LTE: 2100 МГц, 4G LTE: 2600 МГц, 3G: 900 МГц, 3G: 2100 МГц, 2G: 1900 МГц, 2G: 1800 МГц, 2G: 900 МГц, 2G: 850 МГц
- 5) Технологія передачі: 4G LTE Cat.4, 3G DC-HSPA+, 3G HSPA+, 2G GPRS/EDGE
- 6) Максимальна швидкість: 4G - 150 Мб/с, 3G - 42 Мб/с

Основні причини вибору Huawei E3372 для нашого проєкту:

- 1) Сумісність з Raspberry Pi. Модем працює безпосередньо з портами USB 2.0/3.0 RPi.
- 2) Стабільне 4G-з'єднання. Яке дозволяє передавання телеметрії, відео з дрона та достатньо для віддаленого SSH або VPN-доступу.
- 3) Сумісність із SIM-картами та операторами. Працює з SIM-картами будь-якого мобільного оператора, який підтримує LTE.
- 4) Екосистема та спільнота. Один із найпопулярніших модемів для DIY-проєктів.

HUAWEI E3372 — це хороше рішення для мобільного зв'язку в БПЛА: він сумісний із Raspberry Pi, надає стабільний 4G-зв'язок, підтримує різні режими роботи, має широкую документацію, і є перевіреним варіантом у безлічі подібних проєктів. Його використання дозволяє реалізувати надійне та масштабоване керування дроном через мобільну мережу, з можливістю передачі телеметрії й комунікації з наземною станцією у реальному часі.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5. Протокол взаємодії між компонентами.

MAVLink — це дуже легкий протокол обміну повідомленнями для зв'язку з дронами (і між бортовими компонентами дрона).

MAVLink дотримується сучасного гібридного шаблону проектування публікації-підписки та точки-точки: потоки даних надсилаються/публікуються як теми, тоді як підпротоколи конфігурації, такі як протокол місії або протокол параметрів, є точка-точка з повторною передачею.

Повідомлення визначаються у файлах XML . Кожен файл XML визначає набір повідомлень, що підтримується певною системою MAVLink, також званий «діалектом».

Основні функції протоколу:

- передавання телеметрії (GPS, IMU, стан батареї, режим польоту тощо);
- прийом команд керування (режими, зміна місії, позиція);
- обмін повідомленнями про стан, помилки, налаштування;
- передача відео/даних;

Основні переваги:

1) Ефективність. MAVLink 1 має лише 8 байт накладних витрат на пакет, включаючи знак початку та виявлення втрати пакета. MAVLink 2 має лише 14 байт накладних витрат (але є набагато безпечнішим та розширюваним протоколом). Він добре підходить для застосувань з дуже обмеженою пропускну здатністю зв'язку.

2) Універсальність. Можна використовувати багато різних мов програмування, які працюють на багатьох мікроконтролерах/операційних системах

3) Забезпечує зв'язок як поза бортом, так і на борту.

4) Дозволяє одночасно працювати в мережі до 255 систем.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приклад використання у системі:

Raspberry Pi:

- запускає MAVProху або MAVSDK, приймає дані з Pixhawk (через USB/UART);
- пересилає телеметрію через 4G до наземної станції;
- отримує команди з землі.

Pixhawk:

- працює під керуванням PX4 або ArduPilot;
- передає дані про стан дрона через MAVLink;
- реагує на отримані команди.

MAVLink — це ключовий протокол, який забезпечує ефективну, стандартизовану і розширювану взаємодію між усіма компонентами БПЛА-системи. У нашому проєкті він дозволяє передавати телеметрію, приймати команди та підтримувати стабільну комунікацію через 4G з мінімальною затримкою.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

У цьому розділі проведено комплексний аналіз технологічних рішень, необхідних для розробки системи безпілотного літального апарата (БПЛА). Детальне дослідження охопило вибір апаратної платформи, програмного забезпечення та протоколів взаємодії, що дозволило обґрунтувати оптимальні компоненти для реалізації проєкту.

Обрано і описано контролер польоту Pixhawk 4, через свою надійність, ширку підтримку та комюніті та відкриту архітектуру PX4/ArduPilot. Підтверджено сумісність із різноманітними датчиками (IMU, GPS, барометр), що критично для стабілізації та навігації БПЛА.

Також проаналізовано обчислювальний модуль Raspberry Pi, та обрано для нашої системи Raspberry Pi 4 Model B, детально розказано про його характеристики.

Як протоколу взаємодії між нашими компонентами обрано MAVLink, оскільки це стандартизований протокол який забезпечує обмін інформацією між елементами нашої системи.

Порівняно QGroundControl та Mission Planner: обидва інструменти забезпечують планування місій, моніторинг стану БПЛА та аналіз логів.

Для проєкту обрано QGroundControl через сучасний інтерфейс, кросплатформенність та кращу інтеграцію з PX4.

Використання відкритих платформ (PX4, Raspberry Pi OS) дозволяє модифікувати систему для різних сценаріїв використання.

Проведений аналіз став основою для подальшого проєктування модуля керування, забезпечивши технічну можливість реалізації всіх функціональних вимог проєкту.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО МОДУЛЯ КЕРУВАННЯ ЧЕРЕЗ 4G

Відповідно до досліджених матеріалів та обраного способу реалізації ми можемо перейти до фази проєктування модуля керування.

3.1. Постановка задачі.

Розглянувши раніше застосування БПЛА у різних галузях ми пересвідчилися, що у багатьох випадках критично важливим чинником є стабільність зв'язку та радіус дії. Такі види систем керування, як радіоканал або Wi-Fi, мають великі недоліки у дальності дії.

Метою даного розділу є проєктування універсального модуля керування БПЛА через 4G мережу. Цей модуль може забезпечити зв'язок на великій відстані при стабільному покритті, реалізувати передачу команд через стандартні мобільні мережі, звільнити від необхідності додаткового обладнання для керування дроном.

Основними завданнями

- Вибір оптимальних компонентів, таких як контролер польоту, обчислювальний модуль, 4G-модем, для нашого модуля
- Інтеграція компонентів із використанням протоколу MAVLink для передачі даних.
- Налаштування програмного забезпечення для стабільної роботи системи.

У результаті маємо отримати прототип модуля керування БПЛА за допомогою 4G мережі.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дана система дозволить збільшити можливості застосування безпілотників в умовах важких для стандартних методів керування, а саме на великих відстанях або у зонах з поганим радіопокриттям.

3.2. Схема підключення компонентів

Для роботи нашого модуля управління БПЛА потрібно забезпечити правильне підключення усіх компонентів системи. Отже, вибрано: контролер польоту - Pixhawk 4 (Holybro), обчислювальний модуль - Raspberry Pi 4, 4G-модем - HUAWEI E3372.

3.2.1. Живлення

У схемі Raspberry Pi 4 потребує стабільної напруги 5V, тому можна застосувати окремий BEC (5V 5A) для запобігання перезавантаженням, підключити можна через GPIO або USB.

Pixhawk має власний BEC, тому не будемо його навантажувати ще й живленням RPi.

HUAWEI E3372 (модем) буде живитися напряму від RPi.

3.2.2. Зв'язок між Pixhawk та Raspberry Pi

Підключення Pixhawk до Raspberry Pi буде відбуватися через UART, оскільки, з'єднання за допомогою USB буде менш стабільним через більші затримки.

На Pixhawk буде використовуватися порт TELEM2, а на RPi - GPIO UART. За такою схемою з'єднання по пінах:

Pixhawk Telem 2 Tx → Raspberry Pi GPIO 15 (RXD)

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Pixhawk Telem 2 Rx → Raspberry Pi GPIO 14 (T XD)

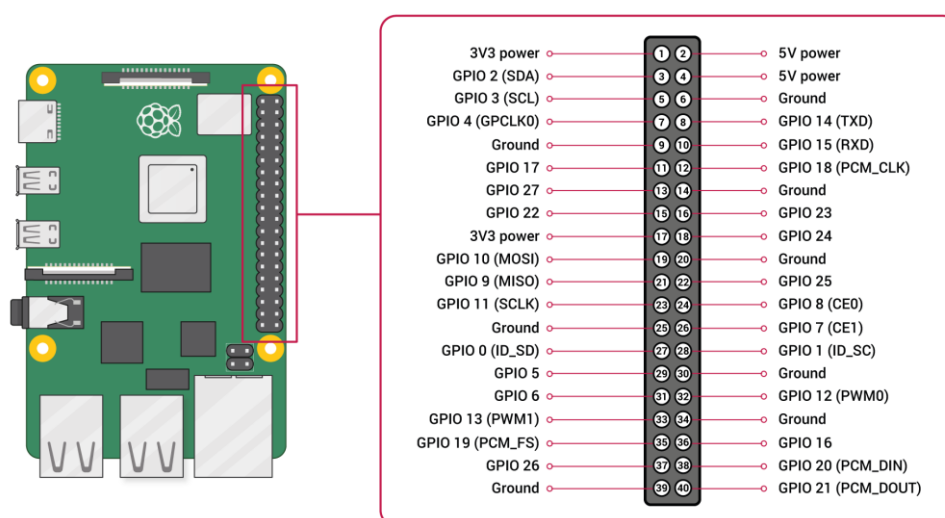


Рисунок. 3.1 – Розпіновка GPIO

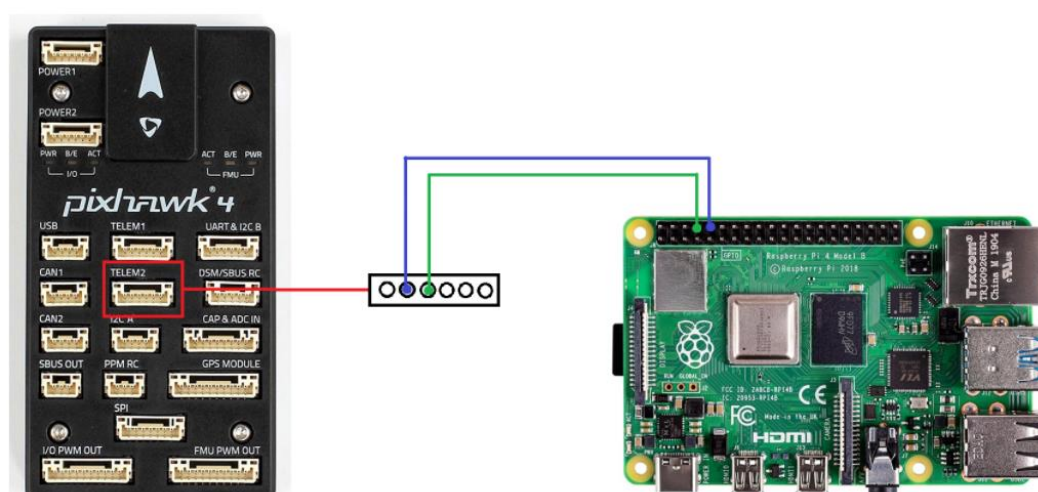


Рисунок. 3.2 – Спосіб з'єднання Pixhawk та Raspberry Pi

3.2.3. Підключення 4G-модема

4G-модем використовуватиметься для передачі телеметрії. З'єднання з Raspberry Pi через відбуватиметься через стандартний кабель USB, HUAWEI

E3372 - USB-роз'єм, RPi - USB 3.0 порт. Для стабільної роботи системи краще використовувати SIM-карту оператора з найкращим покриттям 4G

3.2.4. Додаткові підключення

Оскільки, коли ми підключимо 4G USB-модем і якщо захочемо додатково встановити камеру до Raspberry Pi, Pixhawk не може забезпечити достатній струм для них. Raspberry Pi буде примусово перезавантажено. Тому для живлення Raspberry Pi потрібен стабілізований ВЕС, для цього використаємо Matek Systems PDB-XT60.

Ця плата розподілу живлення (PDB) має:

- 5V ВЕС (3A) – для Raspberry Pi або периферії.
- 12V ВЕС (2A) – для камер, сервоприводів тощо.
- Вхід: XT60 (від LiPo акумулятора).

Підключення до RPi 4 відбуватиметься через все той же GPIO. Використовуючи піни 2 або 4 для 5V, і пін 6 для GND.

З'єднання по пінах:

Matek PDB-XT60 5V → Raspberry Pi GPIO 2 (5V power)

Matek PDB-XT60 GND → Raspberry Pi GPIO 6 (GND)

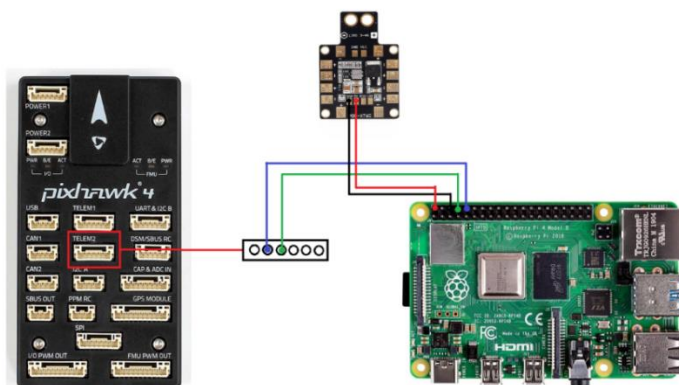


Рисунок. 3.3 – Під'єднання додаткового ВЕС

Pixhawk має вбудований регулятор. Тому ми не будемо підключати його до 5V на XT60, оскільки це спричинить конфлікт живлення.

Переваги Matek PDB-XT60:

- Розмір і компактність.
- XT60-роз'єм для акумулятора, що забезпечує зручне підключення.
- Додаткові 12V, що дозволяють підтримку камер, динміків, світлодіодів та ін. Це може допомогти у подальшій модернізації.

3.2.5. Програмні інтерфейси

Незалежно від того, чи зв'язується контролер польоту з Raspberry Pi, чи Raspberry Pi з наземною станцією, усі вони роблять це через mavlink.

Коли Raspberry Pi отримує дані mavlink від контролера польоту через serial port, маршрутизатор mavlink передаватиме дані mavlink на інші пристрої. (наприклад, наземна станція, симулятор тощо).

Маршрутизатор MAVLink може бути особливо корисним у випадках, коли у вас є дрон із кількома периферійними пристроями (як-от GCS, комп'ютер-супутник тощо), яким потрібно спілкуватися один з одним.

Він може направляти трафік MAVLink з будь-якої кількості інтерфейсів на будь-яку іншу кількість інтерфейсів.

Він підтримує UART і UDP для зв'язку і може додатково реєструвати маршрутизований трафік.

У наших конкретних налаштуваннях маршрутизатор MAVLink зчитує дані контролера польоту з порту UART на Raspberry Pi, а потім направляє дані на порт UDP. Це дозволяє нашій наземній станції ефективно отримувати та обробляти дані про польоти.

Для встановлення mavlink-router переходимо до нашого RPi, встановлюємо git та клонуємо репозиторій з офіційного ресурсу:

```
git clone https://github.com/intel/mavlink-router.git
```

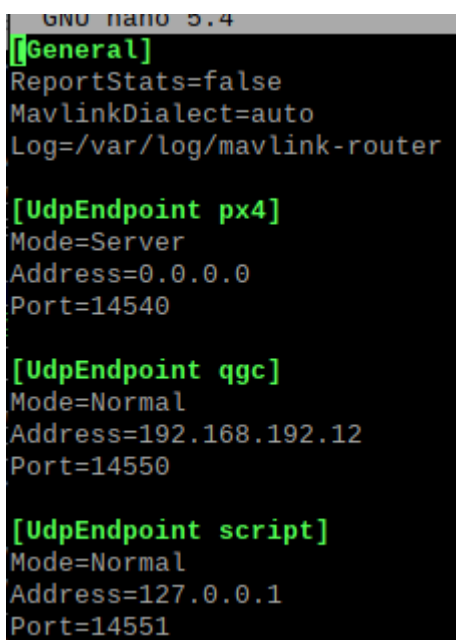
					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
cd mavlink-router
git submodule update --init --recursive
sudo apt install git meson ninja-build pkg-config gcc g++ systemd
```

Створюємо файл конфігурації:

```
sudo mkdir /etc/mavlink-router
cd /etc/mavlink-router
sudo pico main.conf
```

Для моєї віртуальної системи він виглядає так:



```
GNU nano 5.4
[[General]]
ReportStats=false
MavlinkDialect=auto
Log=/var/log/mavlink-router

[UdpEndpoint px4]
Mode=Server
Address=0.0.0.0
Port=14540

[UdpEndpoint qgc]
Mode=Normal
Address=192.168.192.12
Port=14550

[UdpEndpoint script]
Mode=Normal
Address=127.0.0.1
Port=14551
```

Рисунок. 3.4 – Файл конфігурації mavlink-router

Для підключення PX4 та jMAVSim використовуємо такі кроки:

- Запускаємо їх за допомогою команди – `make px4_sitl jmavsim`
- Далі підключаємося до нашого mavlink-router за допомогою команди – `mavlink start -x -u 14550 -o 14540 -t 192.168.192.181 -r 2000`

Для підключення наземної станції використовуємо такі кроки:

Відкрити QGroundControl → Додати з'єднання UDP → ввести IP-адресу та порт RPi.

Рисунок. 3.5 – Налаштування UDP з'єднання.

3.3. Конфігурація UART

Відкриваємо Raspberry Pi Software Configuration Tool за допомогою команди:

```
sudo raspi-config
```

За шляхом Interface Options → Serial Port вибираємо параметр "No", а для login shell → "Yes"

Далі редагуємо файл config.txt, додавши параметр - "enable_uart=1".

```
sudo nano /boot/config.txt
```

3.4. Конфігурація Pixhawk для роботи з MAVLink через 4G

Для інтеграції Pixhawk з 4G-зв'язком необхідно виконаємо деякі налаштувань автопілота.

3.4.1. Оновлення прошивки

- Підключаємо Pixhawk до ПК через USB
- Відкриваємо QGroundControl
- Переходимо у розділ "Firmware"
- Вибираємо стабільну версію PX4
- Натискаємо "Flash" та дочекайтеся завершення

3.4.2. Налаштування параметрів MAVLink

Для реальної системи налаштовуємо параметри так. За шляхом "Vehicle Setup" → "Parameters" встановлюємо такі параметри

Таблиця 3.1. – Значення параметрів MAVLink

Параметр	Значення	Опис
MAV_1_CONFIG	TELEM-2	Порт для зв'язку з RPi
MAV_1_MODE	2	Режим для передачі даних
SER_TEL2_BAUD	921600	Швидкість передачі
MAV_1_RATE	2000	Макс. частота телеметрії
MAV_1_FORWARD	1	Увімкнути переадресацію

3.4.3. Конфігурація потоків даних

У MAVLink Console (QGroundControl) виконуємо команди для встановлення основних потоків:

```
mavlink stream -d /dev/ttyS2 -s ATTITUDE -r 100
```

```
mavlink stream -d /dev/ttyS2 -s GLOBAL_POSITION_INT -r 50
```

```
mavlink stream -d /dev/ttyS2 -s SYS_STATUS -r 20
```

- /dev/ttyS2 - порт TELEM2

- -г - частота (Гц)

3.5. Програмне забезпечення для обміну даними між Pixhawk, Raspberry Pi

Розробимо програмного забезпечення, яке забезпече зв'язок між Pixhawk, Raspberry Pi та наземною станцією. Код написаний на Python з використанням бібліотеки pymavlink. Код прототипа програми надається у додатку.

Розглянемо опис нашої програми:

Таблиця 3.2. – Опис функцій програми.

Функція	Призначення
connect()	Підключається до дрона через MAVLink по UDP, чекає на heartbeat, і повертає об'єкт master для подальшого керування.
arm()	Армує дрон (дозволяє запускати двигуни). Чекає, поки дрон буде заармований.
disarm()	Розармує дрон (вимикає двигуни). Чекає, поки дрон буде розармований.
send_velocity()	Надсилає команду на рух зі швидкостями vx, vy, vz (в локальній системі координат NED) та швидкістю обертання yaw_rate.
enable_offboard()	Активує режим OFFBOARD (керування з комп'ютера), спочатку посилаючи декілька нульових команд, щоб дрон прийняв цей режим.
takeoff()	Зліт на задану висоту (наприклад, 2 м).
land()	Активує режим AUTO.LAND — дрон самостійно сідає.
upload_mission()	Завантажує місію (список точок з GPS-координатами) у дрон
control_loop()	Головний цикл ручного керування з клавіатури
main()	Основна функція

Приклад роботи:

1) Відправка телеметрії

- Pixhawk генерує повідомлення HEARTBEAT, GLOBAL_POSITION_INT

- send_telemetry() перетворює їх у json формат:

```
{  
"timestamp": 1634567890.123,  
"type": "GLOBAL_POSITION_INT",  
"data": {"lat": 505450000, "lon": 305200000, "alt": 15000}  
}
```

- Шифрує та відправляє на наземну станцію

2) Отримання команди

- Наземна станція відправляє запит у json форматі:

```
{"type": "takeoff", "altitude": 20}
```

- receive_commands() дешифрує та викликає takeoff(20)

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3

У цьому розділі було розроблено універсальний модуль керування БПЛА за допомогою 4G-мережі, який забезпечує стабільний зв'язок між автопілотом Pixhawk, Raspberry Pi та наземною станцією на основі нашого програмного забезпечення.

Обрані компоненти забезпечують:

- Високу обчислювальну потужність.
- Стабільний зв'язок на великих відстанях.
- Сумісність із протоколом MAVLink.

Розроблено прототип Python-додатку для:

- Обміну даними через MAVLink.
- Шифрування трафіку.
- Обробки команд із наземної станції.

Було детально розглянуто з'єднання усіх елементів, встановлення програмного забезпечення, налаштовано передачу телеметрії через мобільну мережу, реалізовано шифрування даних.

Головними перевагами модуля управління, можна назвати масштабованість і гнучкість системи. Оскільки, при потребі можна розширити його функції, у залежності від потреб користувача. Наше рішення дозволяє виконувати керування за допомогою власного додатку, або через QGroundControl.

Розроблений модуль є готовим до використання рішенням для дистанційного керування БПЛА через 4G, з можливістю адаптації під різні сценарії (моніторинг, доставка, аерозйомка). Подальші дослідження варто зосередити на оптимізації енергоспоживання та покращенні стабільності зв'язку в умовах перешкод.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ

У цьому розділі досліджено та проаналізовано розроблену систему керування безпілотним літальним апаратом через 4g мережу. Яка розроблена за допомогою Pixhawk та Raspberry Pi і може керуватися за допомогою власного Python-скрипта. Буде оцінено функціональність, стабільність зв'язку, затримки передачі команд і загальна надійність системи в умовах симуляції (jmavsim). Також буде порівняння нашого модуля управління з традиційними методами керування, щоб описати переваги і недоліки його рішення.

4.1. Тестування системи.

Перевіримо з'єднання компонентів через MAVLink:

- 1) На Raspberry Pi запускаємо mavlink-router з нашим main.conf.

```
rpi@raspberrypi:/etc/mavlink-router $ mavlink-routerd -c /etc/mavlink-router/main.conf
mavlink-router version v4-15-g51983a4
Opened UDP Client [4]script: 127.0.0.1:14551
Opened UDP Client [6]qgc: 192.168.192.12:14550
Opened UDP Server [8]px4: 0.0.0.0:14540
Opened TCP Server [9] [::]:5760
```

Рисунок. 4.1 – Запуск mavlink-router на Raspberry Pi.

- 2) Запускаємо PX4+jMAVSim та за допомогою команди запускаємо MAVLink-сервер.

```
pxh> mavlink start -x -u 14550 -o 14540 -t 192.168.192.181 -r 2000
INFO [mavlink] mode: Normal, data rate: 2000 B/s on udp port 14550 remote port 14540
```

Рисунок. 4.2 – Налаштування mavlink на PX4+jMAVSim.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) Перевіряємо наявність зв'язку між Pixhawk та QGC. Після виконання минулих кроків з'явиться з'єднання, а у вкладці «MAVLink Inspector», можна бачити реальний обмін повідомленнями MAVLink.

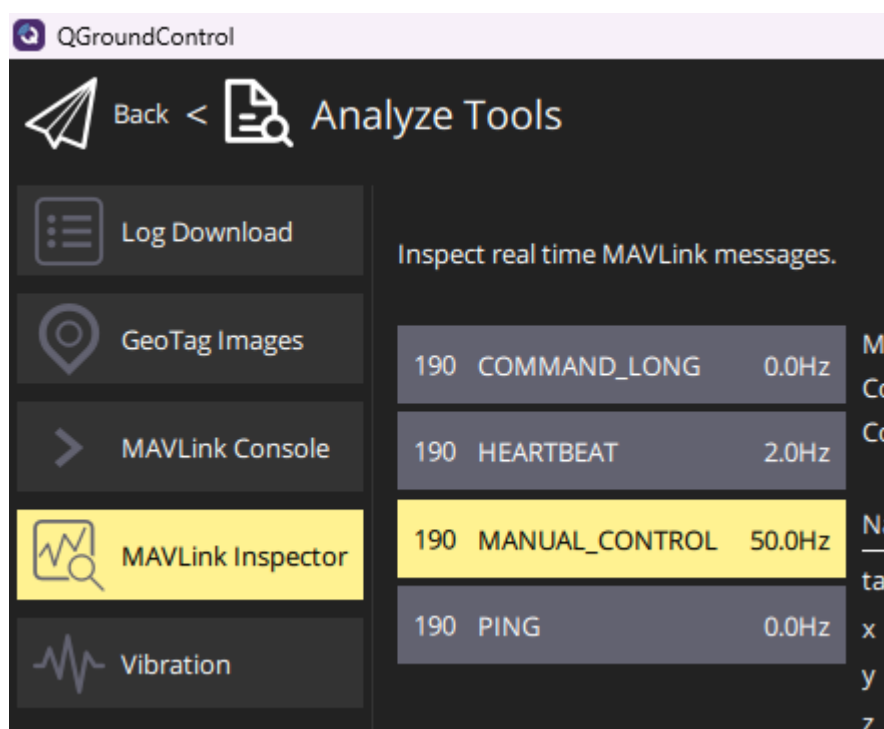


Рисунок. 4.3 – Отримання даних про дрон у QGC.

4.2. Тестування скрипта.

Перевірка працездатності скрипта для управління безпілотником.

Запускаємо скрипт та перевіряємо підключення до нашого безпілотника. Одразу після запуску програми для керування, у QGC дрон армується і переходить у OFFBOARD режим польоту. Цей режим потрібен для керування ззовні (тобто з комп'ютера/скрипта) за допомогою команд по MAVLink.

OFFBOARD застосовується при:

- Ручному керуванні з клавіатури / джойстика
- Керуванні з OpenCV, ROS, AI-алгоритмів
- Автоматичному слідуванні за об'єктом
- Реалізації кастомних сценаріїв

```

Підключення...
Підключено до дрона
Дрон армовано
OFFBOARD активовано
Керування: W/S - рух, A/D - вліво/вправо, Q/E - обертання, Z/X - вгору/вниз
T - зліт, L - посадка, M - місія, O - OFFBOARD, ESC - вихід

```

Рисунок. 4.4 – Запуск програми керування БПЛА.

Перевіримо ручне управління нашим дроном. Керування відбувається через кнопки:

- W/S – рух вперед або назад
- A/D – рух вліво або вправо
- Q/E – обертання
- Z/X – зміна висоти (вверх/вниз)

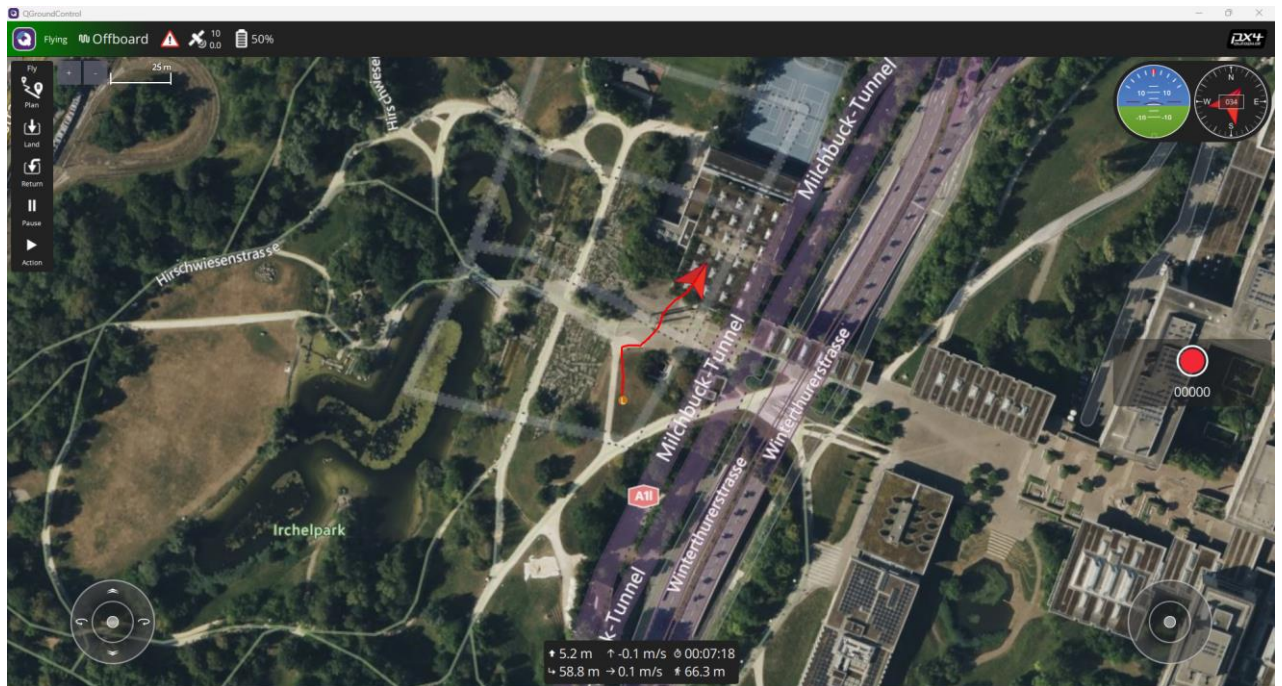


Рисунок. 4.5 – Управління безпілотником у ручному режимі.

Також наша програма має функцію завантаження та виконання місії, а саме польоту за заданими точками. Запускаємо раніше завантажену місію і бачимо результат. Після або під час місії за допомогою клавіші «O» можемо перемкнутися назад на OFFBOARD режим для ручного керування.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

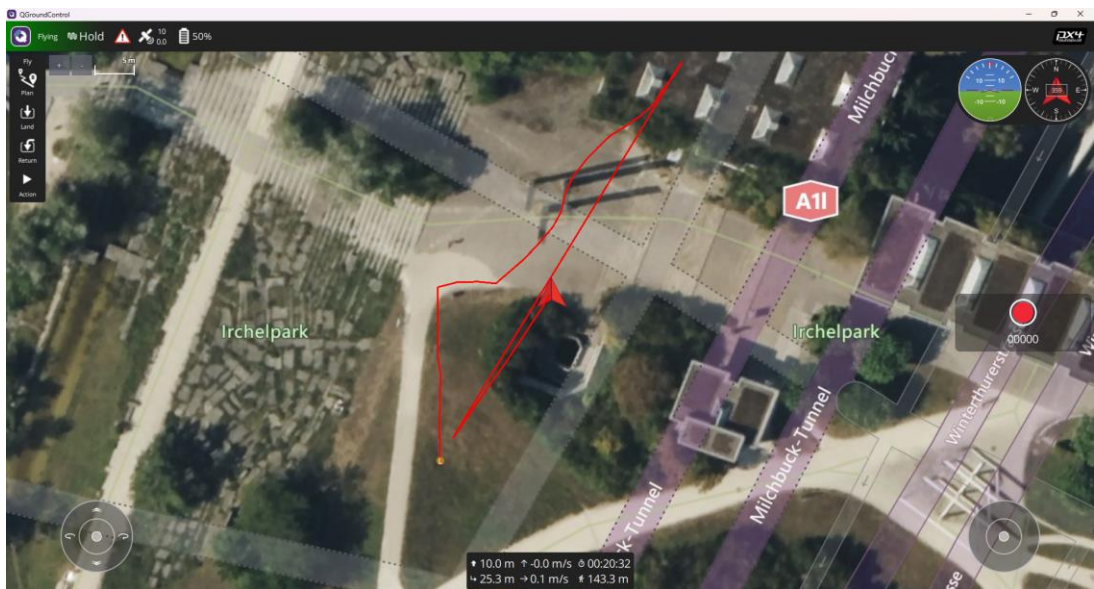


Рисунок. 4.6 – Виконання безпілотником заданої місії.

4.3. Аналіз стабільності та затримок зв'язку.

Стабільність залежить від:

- Якості покриття 4G
- Навантаження на мережу
- Роботи антени та модема
- Перешкод (інші пристрої, погода)

Можливі проблеми:

- Розриви зв'язку при слабкому сигналі.
- Деградіація сигналу при русі БПЛА (ефект Доплера, перемикання базових станцій).
- Перевантаження мережі.

Затримка критично важлива для керування у реальному часі. Вона залежить від завантаження мережі оператора, обробки даних на наших компонентах RPi/Pixhawk та ін.

Система керування через 4G (Pixhawk + RPi + 4G модем) забезпечує глобальний зв'язок і високу пропускну здатність, що дозволяє передавати відео

та телеметрію на великі відстані. Однак її стабільність і затримки залежать від якості покриття 4G, навантаження мережі та обробки даних.

Таблиця 4.1. – Типові значення затримок.

Джерело	Затримка
4G мережа	30–150 мс
Обробка на RPi	10–50 мс
Серверна частина	20–100 мс
Загальна затримка	100–500 мс

Таким чином, система ефективна для задач, де важливі дальність і передача даних, але потребує додаткових заходів для підвищення стабільності в динамічних умовах.

4.4. Порівняння з традиційними методами керування.

Система керування через 4G відкриває нові можливості для дистанційного контролю та гнучкості, особливо корисна для польотів на великій відстані або в складних умовах. Проте вимагає уважного підходу до аналізу затримок і стабільності зв'язку, а також забезпечення резервних методів управління для підвищення безпеки.

Основні недоліки управління через 4G:

- Традиційні методи — надійніші в умовах відсутності інтернету.
- Наш підхід залежить від якості 4G-зв'язку і може мати затримки, які не підходять для швидких реакцій.
- Необхідність додаткових налаштувань та тестування.

Таблиця 4.2. – Порівняння систем керування.

Аспект	Традиційні методи	4G
Дальність зв'язку	Обмежена (кілька км, залежно від радіо)	Практично необмежена (покриття 4G)
Гнучкість керування	Зазвичай фіксовані режими або простий пульт	Повністю програмоване, можливість складної логіки та інтеграції з ШІ
Затримки та стабільність	Низькі затримки (десятки мс)	Вищі затримки (150-200 мс)

Складність впровадження	Просте підключення пульта	Потрібне налаштування 4G, програмування
Моніторинг і телеметрія	Обмежений стандартним ПЗ	Повний доступ до телеметрії, розширені можливості логування
Можливість дистанційного керування	Локальна зона покриття радіо	Керування з будь-якої точки світу, де є 4G
Залежність від мережі	Немає	Вимагає стабільного 4G-зв'язку

4G-керування краще для:

- Дальніх місій у містах/зонах з хорошим покриттям.
- Передачі великих обсягів даних (відео, телеметрія).
- Глобального моніторингу (наприклад, для доставки дронами).

Традиційні методи краще для:

- Швидкого реагування (низька затримка).
- Роботи у віддалених зонах без 4G.
- Простих і дешевих рішень.

4.5. Рекомендації щодо розвитку та вдосконалення додатка.

У майбутньому для покращення і поглиблення функціональності можна додати декілька напрямків змін. Технічно нашу систему можна покращувати додавши сенсори для збору інформації, камери для контролю ситуації у реальному часі, та інші покращення в залежності від виду застосування БПЛА. Програмно ж у подальшому можна провести розширення підтримки протоколів зв'язку (дати підтримку 5G, реалізувати резервний канал зв'язку на випадок втрати 4G), додати підтримку штучного інтелекту для обробки відео- і сенсорних даних у реальному часі, розробити зручний графічний інтерфейс для моніторингу стану дрона і управління місіями, для безпеки можна впровадити шифрування MAVLink-повідомлень для захисту від несанкціонованого доступу.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4

У даному розділі було проведено тестування та аналіз розробленої системи керування БПЛА через 4G-мережу на базі Pixhawk, Raspberry Pi та 4G-модема. Отримані результати дозволили оцінити ефективність системи, виявити її переваги та недоліки, а також сформулювати рекомендації щодо подальшого вдосконалення.

Система забезпечує стабільний зв'язок із БПЛА, дозволяючи передавати керуючі команди, телеметрію на значні відстані.

Тестування програми виявило ефективність у керуванні дроном, однак було помічено можливі оптимізації для зменшення навантаження на процесор та покращення відповіді системи.

Система демонструє хорошу продуктивність у зонах із якісним покриттям 4G, проте затримки (100–500 мс) можуть обмежувати її застосування в задачах, що вимагають миттєвого реагування.

Порівняння з традиційними методами керування (радіоканал, телеметрія) підкреслило головні переваги 4G-рішення – необмежену дальність і можливість передачі великих обсягів даних, а також його недоліки – залежність від інфраструктури оператора та вищі затримки.

Наведено рекомендації щодо розвитку системи, для покращення у майбутньому.

Розроблена система є перспективним рішенням для керування БПЛА на великих відстанях, особливо в умовах, де важливі передача даних і глобальний зв'язок. Однак для забезпечення максимальної надійності та ефективності необхідно враховувати обмеження, пов'язані із затримками та стабільністю зв'язку, і впроваджувати запропоновані оптимізації. Подальший розвиток системи має спрямовуватися на підвищення її адаптивності до різних умов експлуатації та інтеграцію з сучасними технологіями зв'язку.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було досліджено, спроектовано, та проаналізовано систему керування БПЛА через 4G мережі. Це було зроблено за допомогою обчислювальний модуля польотного контролера Pixhawk та протоколу MAVLink. Система розроблена для забезпечення стабільного, гнучкого та розширюваного дистанційного керування безпілотниками на великій відстані у реальному часі.

Спочатку розглянуто та проаналізовано загальне поняття БПЛА, їх типи та галузі застосування. Оглянуто найпопулярніші їх класифікації. Аналіз цієї інформації дозволив зрозуміти технічні особливості, тенденції застосування, причини виникнення і користь використання безпілотників.

Проведено порівняння різних каналів зв'язку: радіоканалу, Wi-Fi, телеметрії та мобільного інтернету (LTE/4G/5G). В результаті було вибірано 4G як основний каналу зв'язку у цьому проєкті, що забезпечує великий радіус дії, стабільність та доступність для цивільних рішень.

Було проаналізовано та описано головні характеристики і переваги компонентів, та обґрунтовано їх вибір для модуля керування. Зокрема:

- Контролера Pixhawk як польотного комп'ютера з підтримкою стандартних протоколів;
- Raspberry Pi як потужного обчислювального модуля для маршрутизації телеметрії, запуску керуючих скриптів та взаємодії з мережею;
- 4G-модема, який дозволяє вийти за межі прямої радіовидимості;
- Протоколу MAVLink як стандарту для обміну командами та телеметрією;
- QGroundControl як інтерфейсу наземної станції.

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такий набір компонентів дозволяє створити універсальний модуль для автономного та ручного управління БПЛА з будь-якої точки, де є мобільний інтернет, та можливістю подальшого вдосконалення системи.

Розроблено схему підключення всіх компонентів з урахуванням живлення, UART-з'єднань і підключення 4G-модема. Налаштовано Raspberry Pi для правильного застосування. Проведено налаштування Pixhawk для коректної роботи з MAVLink-потоками.

Створено та протестовано Python-скрипт для ручного керування дроном за допомогою клавіатури, що дає змогу швидко та гнучко впливати на польотні параметри через інтернет.

Було проведено тестування програмного забезпечення, аналіз стабільності зв'язку.

Було порівняно нашу систему з традиційними методами керування. Результати виявили кращу гнучкість і більший радіус дії в системі через 4G, хоча слід враховувати залежність від мобільного покриття.

Оцінено стабільність системи в моделюванні польотів (jmavsim) — вона показала задовільну роботу навіть при довготривалому з'єднанні та симуляції складних сценаріїв.

Проект також демонструє високий рівень інтеграції апаратних та програмних рішень, що може бути використано у цивільних, наукових і навіть військових цілях. Результати досліджень доводять, що за умови правильного налаштування 4G-зв'язок є життєздатною альтернативою традиційним засобам керування БПЛА, особливо у випадках, де потрібен великий радіус дії, адаптивність і економічність.

У майбутньому система може бути розширена до повноцінного автономного керування з додатковими можливостями комп'ютерного зору,

					ІАЛЦ.467200.003 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

адаптивного планування місій та віддаленого моніторингу у хмарному середовищі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mohammad H. Sadraey, "Fundamentals of UAV Design: An Aerospace Engineering Approach", Wiley, 2020.
2. Paul G. Fahlstrom, Thomas J. Gleason, "Introduction to UAV Systems", Wiley, 4th Edition.
3. Теорія і практика застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) – Київ: ЛІТЕРА, 2023. – 126 с. – (978-966-370-793-8)
4. Tymochko O.I. Klasyfikatsiia bezpilotnykh litalnykh aparativ / O.I. Tymochko, D.Iu. Holubnychy, V.F. Tretiak, I.V. Ruban // Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. – 2007. – Vyp. 1(9) – S. 61.
5. Глотов В., Церклевич А. Аналіз і перспективи аерознімання з безпілотного літального апарата // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2014. – Вип. I (27). – С. 131-136.
6. Книш Б. П., Кулик Я. А., Барабан М. В.. Класифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання для доставки товарів. Книш Б. П. Класифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання для доставки товарів [Текст] / Б. П. Книш, Я. А. Кулик, М. В. Барабан // Вісник Хмельницького національного університету. Серія "Технічні науки". – 2018. – № 3(247). – С. 246-252.
7. - Гуцул Т., Жежера І., Ткач В. Особливості класифікації та методів вибору БПЛА // Технічні науки та технології. Чернігівський національний технологічний університет. 2024. №4(30). С. 201–212.
8. Joint Doctrine Note 2/11. The UK Approach to Unmanned Aircraft Systems. London : Development, Concepts and Doctrine Centre, 2011. 102 p.
9. Алексеев С. В. Безпілотні літальні засоби: історія та перспективи розвитку // Сучасна спеціальна техніка. 2014. № 3(38). С. 89–98.
10. Андрійчук В. Ю., Ковальчук І. П. Геодезичні роботи з використанням БПЛА. – К.: НУВГП, 2021.
11. Gonçalves J. A., Henriques R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 104. – P. 101-111.
12. Іванов О. В., Петренко С. М. Безпілотні технології в моніторингу інфраструктури. – К.: НТУ, 2022.

- 13.Смирнов А. В., Коваленко І. П. Безпілотні літальні апарати в рятувальних операціях. – К.: НУЦЗУ, 2023.
14. Paul G. Fahlstrom, Thomas J. Gleason "Introduction to UAV Systems"
- 15.Зайцев О.В., Мельник С.М. Класифікація безпілотних літальних апаратів // International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2023. №3. С. 45–59
- 16.Сидоренко П.В., Ковальчук І.В. Особливості класифікації та методів вибору БПЛА // Технічні науки та технології. Чернігівський національний технологічний університет. 2024. №6(28). С. 112–125.
- 17.Офіційна документація Holybro Pixhawk 4 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixhawk4.html
- 18.Офіційна документація Raspberry Pi 4 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>
- 19.Офіційна документація MAVLink [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://mavlink.io/en/>
- 20.Учбова програма для інструкторів пілотів БПЛА [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2023/10/%D0%A3%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B2_%D0%91%D0%9F%D0%9B%D0%90_%D0%92%D0%A1%D0%A3_2023.pdf
- 21.Communicating with Raspberry Pi via MAVLink [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ardupilot.org/dev/docs/raspberry-pi-via-mavlink.html>

ДОДАТОК 1

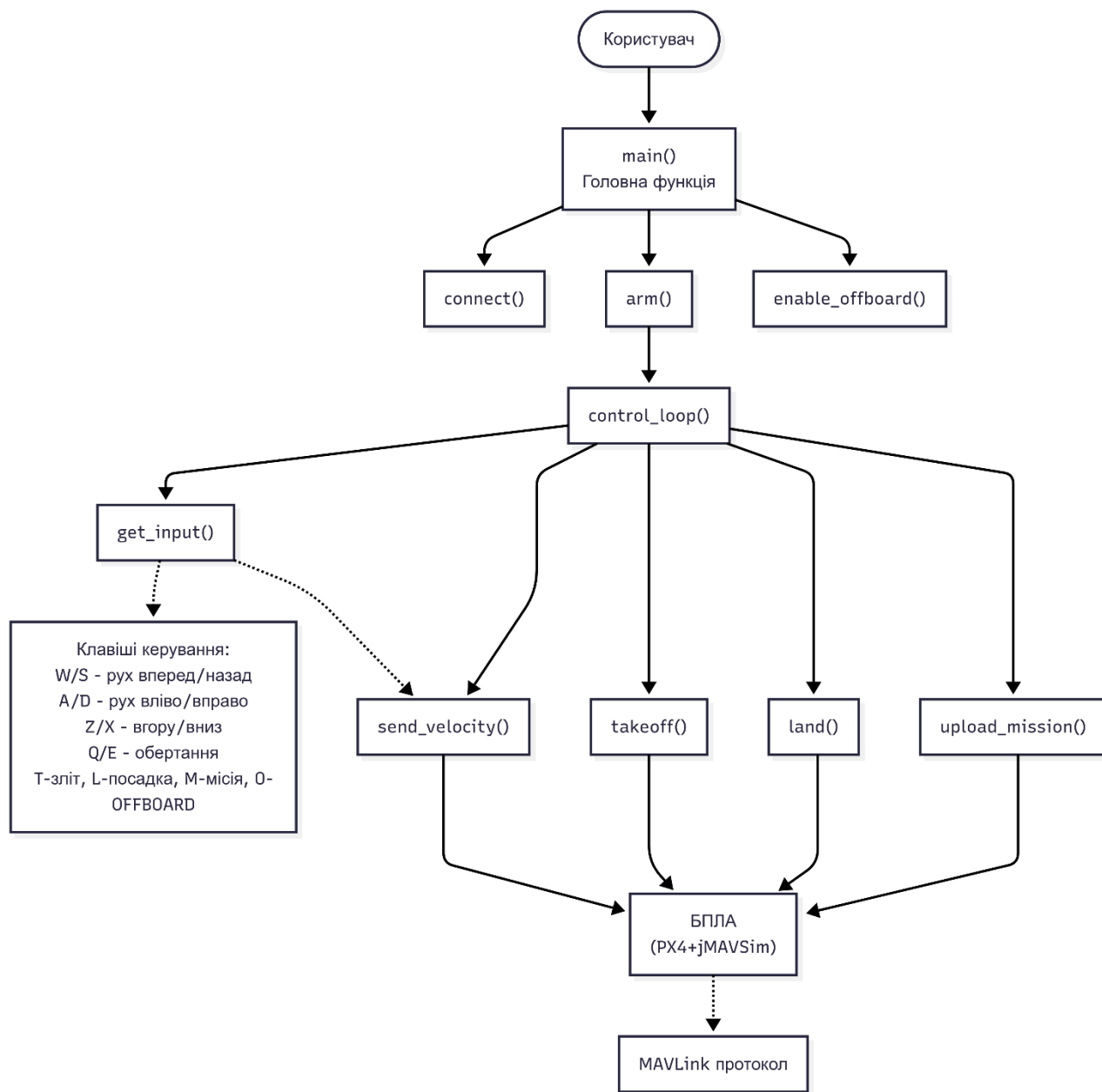
Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі

Структурна схема системи

ІАЛЦ.467200.004 Д1

Аркушів 1

Київ 2025 р



ІАЛЦ.467200.004 Д1					Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі			Літ. Аркуш Аркушів		
		№ докум.	Підпис	Дата						
Розробив	Григор'єв К. С.				Структурна схема системи			1	1	НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФІОТ, ІІ-73
Перевірив	Аленін О. І.									
Н. Контр.	Міщенко Л. Д.									
Затвердив										

ДОДАТОК 2

Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі

Функціональна схема (діаграма класів)

ІАЛЦ.467200.005 Д2

Аркушів 1

Київ 2025 р

ДОДАТОК 3

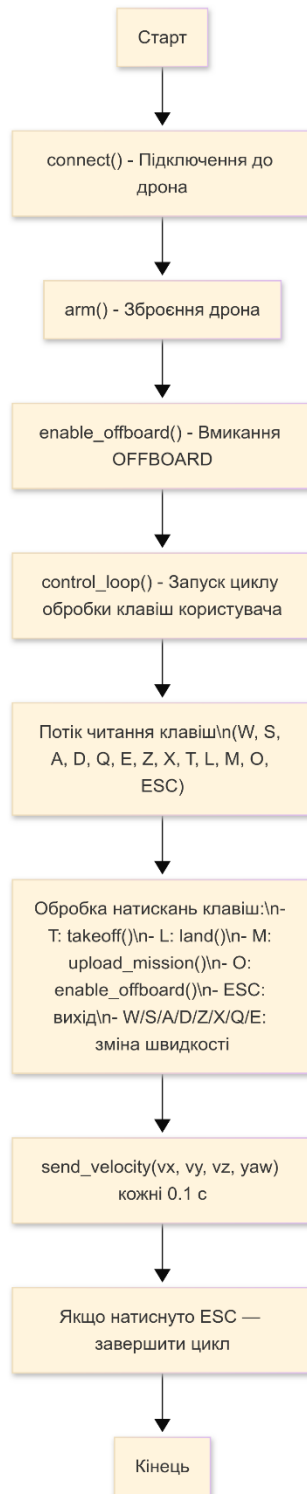
Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі

Алгоритм дій програмного забезпечення

ІАЛЦ.467200.006 ДЗ

Аркушів 1

Київ 2025 р



					ІАЛЦ.467200.006 ДЗ			
		№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Григор'єв К. С.				Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі Алгоритм дій програмного забезпечення		Літ.	Аркуш
Перевірив	Аленін О. І.							1
Н. Контр.	Міщенко Л. Д.						НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФІОТ, ІІІ-73	
Затвердив								

ДОДАТОК 4

Система керування БПЛА за допомогою 4G мережі

Текст програмного коду

ІАЛЦ.467200.007 Д4

Аркушів 4

Київ 2025 р

```

from pymavlink import mavutil
import time, threading
from ctypes import c_uint32
import keyboard

CONNECTION_STRING = 'udp:127.0.0.1:14551'

def connect():
    print("Підключення...")
    master = mavutil.mavlink_connection(CONNECTION_STRING)
    master.wait_heartbeat()
    print("Підключено до дрона")
    master.target_system = 1
    master.target_component = 1
    return master

def arm(master):
    master.arducopter_arm()
    master.motors_armed_wait()
    print("Дрон армовано")

def disarm(master):
    master.arducopter_disarm()
    master.motors_disarmed_wait()
    print("Дрон розармовано")

def send_velocity(master, vx, vy, vz, yaw_rate=0):
    type_mask = 0b0000111111000111
    master.mav.set_position_target_local_ned_send(
        c_uint32(int(time.time() * 1000)).value,
        master.target_system,
        master.target_component,
        mavutil.mavlink.MAV_FRAME_LOCAL_NED,
        type_mask,
        0, 0, 0,
        vx, vy, vz,
        0, 0, 0,
        0, yaw_rate
    )

def enable_offboard(master):
    for _ in range(20):
        send_velocity(master, 0, 0, 0)
        time.sleep(0.1)
    master.set_mode("OFFBOARD")
    print("OFFBOARD активовано")

def takeoff(master, target_alt=2.0):
    print(f"Зліт до {target_alt} м...")
    vz = -0.5
    duration = target_alt / abs(vz)
    start = time.time()
    while time.time() - start < duration:
        send_velocity(master, 0, 0, vz)
        time.sleep(0.1)
    for _ in range(10):
        send_velocity(master, 0, 0, 0)
        time.sleep(0.1)

```

					ІАЛЦ.467200.007 Д4	Арк.
						1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

print("Висота досягнута")

def land(master):
    from pymavlink.dialects.v20 import common as mavlink2
    print("Посадка...")
    master.set_mode("AUTO.LAND")
    print("Посадка активована через AUTO.LAND")

def upload_mission(master, waypoints):
    from pymavlink.dialects.v20 import common as mavlink2
    print("Завантаження місії...")

    master.mav.mission_clear_all_send(master.target_system, master.target_component)
    master.mav.mission_count_send(master.target_system, master.target_component,
len(waypoints))

    for i, wp in enumerate(waypoints):
        msg = master.recv_match(type='MISSION_REQUEST', blocking=True, timeout=5)
        if not msg:
            print("Не отримано MISSION_REQUEST")
            return

        master.mav.mission_item_send(
            master.target_system,
            master.target_component,
            i,
            mavlink2.MAV_FRAME_GLOBAL_RELATIVE_ALT,
            mavlink2.MAV_CMD_NAV_WAYPOINT,
            0, 1, 0, 0, 0, 0,
            wp['lat'], wp['lon'], wp['alt']
        )

    print("Місія завантажена")

    arm(master)

    master.mav.command_long_send(
        master.target_system,
        master.target_component,
        mavlink2.MAV_CMD_MISSION_START,
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
    )
    print("Виконання місії")

def control_loop(master):
    print("Керування: W/S - рух, A/D - вліво/вправо, Q/E - обертання, Z/X - вгору/вниз\nП -
зліт, L - посадка, M - місія, O - OFFBOARD, ESC - вихід")

    vx = vy = vz = yaw = 0
    step = 0.9
    max_vel = 3.0

    def get_input():
        nonlocal vx, vy, vz, yaw
        while True:
            if keyboard.is_pressed('w'):
                vx = min(max_vel, vx + step)

```

					ІАЛЦ.467200.007 Д4	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

elif keyboard.is_pressed('s'):
    vx = max(-max_vel, vx - step)
else:
    vx = 0

if keyboard.is_pressed('d'):
    vy = min(max_vel, vy + step)
elif keyboard.is_pressed('a'):
    vy = max(-max_vel, vy - step)
else:
    vy = 0

if keyboard.is_pressed('z'):
    vz = max(-max_vel, vz - step)
elif keyboard.is_pressed('x'):
    vz = min(max_vel, vz + step)
else:
    vz = 0

if keyboard.is_pressed('e'):
    yaw = min(1.0, yaw + 0.05)
elif keyboard.is_pressed('q'):
    yaw = max(-1.0, yaw - 0.05)
else:
    yaw = 0

if keyboard.is_pressed('t'):
    takeoff(master)
if
keyboard.is_pressed('l'):
    land(master)
if keyboard.is_pressed('m'):
    upload_mission(master, [
        {'lat': 47.3977415, 'lon': 8.5455937, 'alt': 10},
        {'lat': 47.3978425, 'lon': 8.5456937, 'alt': 10},
        {'lat': 47.3979435, 'lon': 8.5457937, 'alt': 10}
    ])
if keyboard.is_pressed('o'):
    enable_offboard(master)
if keyboard.is_pressed('esc'):
    break

time.sleep(0.05)

input_thread = threading.Thread(target=get_input)
input_thread.start()

while input_thread.is_alive():
    send_velocity(master, vx, vy, vz, yaw)
    time.sleep(0.1)

print("Зупинено")

def main():
    master = connect()
    arm(master)

```

					ІАЛЦ.467200.007 Д4	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
enable_offboard(master)
control_loop(master)

if __name__ == "__main__":
    main()
```