

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики
Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
Кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра

студента Медведенко Лариси Андріївни

академічної групи 172-20-1

спеціальності 172 Електронні комутації та радіотехніка

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою Телекомунікації та радіотехніка

на тему «Дослідження протоколів зв'язку дронів для виконання

колективних завдань»

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			
розділів:				
спеціальний	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.			
економічний	к.е.н., доц. Романюк Н.М.			

Рецензент			
-----------	--	--	--

Нормоконтроль	к.ф.-м.н., проф. Гусєв О.Ю.		
---------------	-----------------------------	--	--

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики
Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
безпеки інформації та телекомунікацій
_____ д.т.н., проф. Корнієнко В.І.
« _____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу ступеня бакалавра
студенту _____ *Медведенко Л. А.* _____ академічної групи *172-20-1*
спеціальності _____ *172 Електронні комунікації та радіотехніки*
спеціалізації _____
за освітньо-професійною програмою _____ *Телекомунікації та радіотехніка*
на тему _____ *«Дослідження протоколів зв'язку дронів для виконання*
колективних завдань

Затвержено наказом ректора НТУ "Дніпровська політехніка" від _____ № _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
<i>Стан питання. Постановка задачі</i>	Аналітичний огляд літератури по темі проекту. Дослідження протоколів зв'язку.	Березень 2024
<i>Спеціальна частина</i>	Аналіз технології, принцип роботи квадрокоптерів та керування ними.	Квітень 2024
<i>Економічний розділ</i>	Розрахунок капітальних витрат	Травень 2024

Завдання видано _____
(підпис керівника)

Гусев О. Ю.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: 15 лютого 2024 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії: _____

Прийнято до виконання _____
(підпис)

Медведенко Л. А.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 96 с., 43 рис., 4 табл., 4 додатків, 25 джерел.

Об'єкт дослідження: процеси комунікації дронів для виконання колективних завдань.

Предмет дослідження: дослідження протоколів зв'язку дронів для виконання колективних завдань.

Мета дипломного проекту: дослідження та аналіз ефективності протоколів зв'язку дронів для виконання колективних завдань.

У першому розділі виконаний аналітичний огляд літературних джерел з теми дипломного проекту. Розглянуто існуючі протоколи зв'язку для дронів, проаналізовано їх особливості та ефективність у виконанні колективних завдань. Здійснено постановку задачі роботи. Аналіз технології розробки квадрокоптерів та керування ними.

У другому розділі проведено аналіз технології розробки квадрокоптерів та методів їх керування. Розглянуто сучасні технології, що використовуються в цій галузі, та їх вплив на ефективність виконання колективних завдань. Економічний розрахунок.

У третьому розділі виконано розрахунок капітальних витрат на розробку і впровадження системи зв'язку дронів для колективних завдань.

ДРОНИ, ПРОТОКОЛИ ЗВ'ЯЗКУ, КОЛЕКТИВНІ ЗАВДАННЯ,
МЕРЕЖЕВА КОМУНІКАЦІЯ, АВТОНОМНІ СИСТЕМИ, РОЗРОБКА
КВАДРОКОПТИ

ABSTRACT

Explanatory note: 96 p., 43 fig., 4 tab., 4 appendices, 25 sources.

Object of research: communication processes of drones for the performance of collective tasks.

Subject of development: the study of communication protocols of drones for the performance of collective tasks.

Purpose of the diploma project: research and analysis of the effectiveness of drone communication protocols for the performance of collective tasks.

The first chapter includes an analytical review of literary sources on the topic of the diploma project. Existing drone communication protocols are examined, their features and effectiveness in performing collective tasks are analyzed. The task of the work is formulated. Analysis of quadcopter development technology and control.

The second chapter conducts an analysis of quadcopter development technology and methods of their control. Modern technologies used in this field and their impact on the effectiveness of performing collective tasks are discussed. Economic calculation.

The third chapter calculates the capital costs for the development and implementation of a drone communication system for collective tasks.

DRONES, COMMUNICATION PROTOCOLS, COLLECTIVE TASKS, NETWORK COMMUNICATION, AUTONOMOUS SYSTEMS, QUADCOPTER DEVELOPMENT.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ACCESS (Advanced Communication Control Elevated Spread Spectrum) - розширений контроль зв'язку розширений спектр (протокол).

ACCST (Advanced Continuous Channel Switching Technology) - передова технологія безперервного перемикання каналів (протокол).

ACK - Acknowledgement Bit.

ACK (Acknowledge) – сигнал/повідомлення підтвердження.

AFHDS (Automatic Frequency Hopping Digital System) - цифрова система автоматичної стрибкоподібної зміни частоти (протокол).

CAN (Controller Area Network) – комунікаційна шина.

CRSF (Crossfire) - протокол.

CS (Chip Select) – лінія активації пристрою під час зв'язку.

DSM2 (Digital Spectrum Modulation 2) - модуляція цифрового спектру (протокол).

DSPX (Digital Signal Processing eXtended) - розширена цифрова обробка сигналу (протокол).

ESC (Electronic Speed Controller) - електронний регулятор швидкості.

FAI (Federation Aeronautique Internationale) - міжнародна авіаційна федерація.

FASST (Futaba Advanced Spread Spectrum Technology) - розширена технологія розширеного спектру Futaba (протокол).

FHSS (Futaba High-Speed Spread Spectrum) - протокол.

GPS (Global Positioning System) - глобальна система позиціонування.

GS (Ground station) – наземна станція керування.

I2C (Inter-Integrated Circuit) - послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем (протокол).

iBUS (intelligent Bus) - протокол.

IMU (Inertial Measurement Unit) - інерційний вимірювальний блок (в акселометрі).

LAN (Local Area Network) - локальна мережа.

LiPo – Lithium Polymer.

MAC (Media Access Control) - управління доступом до посередників.

MAVLink (Micro Air Vehicle Link) – протокол.

NACK (Negative Acknowledge) - сигнал/повідомлення негативне підтвердження.

PPM (Pulse Position Modulation) - імпульсно-позиційна модуляція.

PWM (Pulse Width Modulation) - ШІМ (широтно-імпульсна модуляція).

RX (Receive) – приймач.

SBUS (Serial Bus) –протокол.

SCL (Serial Clock) - послідовний годинник.

SDA (Serial Data) - послідовні дані.

S-FHSS (Super Futaba High Speed Spread Spectrum) – протокол.

SPI (Serial Peripheral Interface) - синхронний послідовний протокол зв'язку.

T-FHSS (Telemetry Futaba High-Speed Spread Spectrum) - протокол.

TX (Transmit) – передавач.

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) - універсальний асинхронний приймач-передавач.

XBUS (eXpandable BUS) – протокол.

БПЛА - Безпілотний літальний апарат.

MEMS – мікроелектромеханічні системи.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	11
1.1 Що таке дрони. Початок епохи дронів	11
1.2 Принцип дії квадрокоптерів	14
1.3 Склад мультикоптера.....	16
1.4 Безпілотна аерозйомка. Перші успіхи	18
1.5 Відродження мультироторов. Дрони для аерозйомки	18
1.6 Використання протоколів для керування	19
1.7 Протоколи «приймач-контролер»	23
1.8 Протоколи ESC.....	30
1.9 Популярні внутрішні протоколи зв'язку	32
1.9.1 UART	32
1.9.2 I2C.....	35
1.9.3 SPI.....	39
1.9.4 CAN	42
1.10 Зв'язок між роєм дронів	45
1.11 Постановка задачі	51
1.12 Висновки за розділом 1	51
2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБКИ КВАДРОКОПТЕРІВ ТА КЕРУВАННЯ НИМИ.	54
2.1 Апаратне забезпечення.....	54
2.2 Програмне забезпечення/Безпілотне керування	57
2.2.1. ArduPilot.....	57
2.2.2. PX4.....	59
2.2.3. Betaflight.....	60

2.2.4. Cleanflight.....	61
2.2.5. INAV.....	62
2.3. Комунікація програмного забезпечення для керування польотами квадрокоптерів.	63
2.4 Збірка апаратної частини БПЛА.....	66
2.5 Розробка принципу роботи рою дронів.....	77
2.6 Висновки до другого розділу.....	81
3 ЕКОНОМІЧНІ РОЗДІЛ.....	82
3.1 Техніко-економічне обґрунтування дослідження і розробки.....	82
3.2 Визначення середньої заробітної плати спеціаліста в галузі розробки дронів.....	84
3.3 Розрахунок витрат на заробітну плату.....	84
3.4 Розрахунок витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення.....	85
3.5 Розрахунок капітальних витрат.....	87
3.6 Висновки до третього розділу.....	87
ВИСНОВОКИ.....	89
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	93

ВСТУП

У сучасному світі дрони займають все більш важливе місце в різних сферах діяльності, включаючи промисловість, сільське господарство, розваги та безпеку. Кілька років тому низка держав одночасно спробували застосовувати безпілотні літальні апарати в пошуково-рятувальних операціях. Результати були вражаючими. Як виявилось, дрони можна використовувати не тільки для проведення аерофотозйомки та моніторингу ситуації в небезпечних районах – їх можливості набагато ширші. У важкодоступних та небезпечних районах квадрокоптери – «очі» та «вуха» сучасних рятувальних служб. Маленькі, легкі та верткі БПЛА все частіше замінюють гелікоптери під час проведення пошуково-рятувальних операцій – дрони можуть проникнути туди, куди гелікоптеру дороги немає, наприклад, у палаючу будівлю або густий ліс. Аерофотозйомка з дронів допомагає спеціалістам скоригувати план проведення рятувальної операції, визначити масштаби лиха та отримати точний прогноз щодо подальшого розвитку ситуації. Використання дронів у таких операціях дозволяє швидко й ефективно охоплювати великі території, забезпечуючи оперативне реагування та координацію рятувальних служб. Незважаючи на численні переваги, використання дронів у пошуково-рятувальних операціях стикається з низкою викликів. Однією з основних проблем є забезпечення надійної та стабільної комунікації між великою кількістю дронів, що діють у складі однієї команди. Протоколи зв'язку, що використовуються для цього, повинні гарантувати безперебійну передачу даних в реальному часі, високу надійність та енергоефективність. Вирішення цих питань є критично важливим для успішного виконання колективних завдань дронами.

З усього вище викладеного можна зрозуміти, що дрони мають великий потенціал у пошуково-рятувальних операціях, тому дослідження та аналіз ефективності протоколів зв'язку дронів для виконання колективних завдань є актуальним завданням.

1 СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.

1.1 Що таке дрони. Початок епохи дронів

Своє походження слово «дрон» бере від англійського слова “drone”, що перекладається як комаха, самець бджоли – трутень. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) — літальні апарати без екіпажу та пасажирів на борту. Це можуть бути автоматизовані «дрони» або дистанційно керовані апарати. БПЛА можуть літати протягом тривалого часу на контрольованій швидкості та висоті та відіграють роль у багатьох аспектах авіації. Сьогодні, дронами в побуті в основному називають мультироторні літальні апарати – квадрокоптери. Першим аеродинаміком, важчим за повітря, який злетів вертикально, був чотирироторний гелікоптер, розроблений Луї Бреге . Його випробували лише в прив’язаному польоті та на висоті кількох футів. У 1908 році повідомлялося, що він літав «кілька разів», хоча подробиць мало. У 1920-х роках Етьєн Еміхен експериментував із конструюванням вертольотів. Серед конструкцій, які він випробував, був Oehmichen № 2 (фото наведено на рис. 1.1), який використовував чотири дволопатевих ротори та вісім пропелерів, які приводилися в рух одним двигуном. Кут лопатей ротора можна було змінювати шляхом викривлення. П’ять гвинтів, що обертаються в горизонтальній площині, стабілізували машину збоку. Інший пропелер був встановлений на носі для керування. Решта пара гвинтів функціонувала як його передній рушій. Літак продемонстрував значний для свого часу ступінь стабільності та збільшення точності керування та здійснив понад тисячу випробувальних польотів протягом середини 1920-х років. До 1923 року він був у змозі залишатися в повітрі протягом кількох хвилин, а 14 квітня 1924 року він встановив перший в історії FAI рекорд дистанції для вертольотів у 360 м (390 ярдів). Він продемонстрував здатність проходити круговий курс, а пізніше здійснив перший 1 кілометр (0,62 милі) польоту за замкнутим контуром на вертольоті.

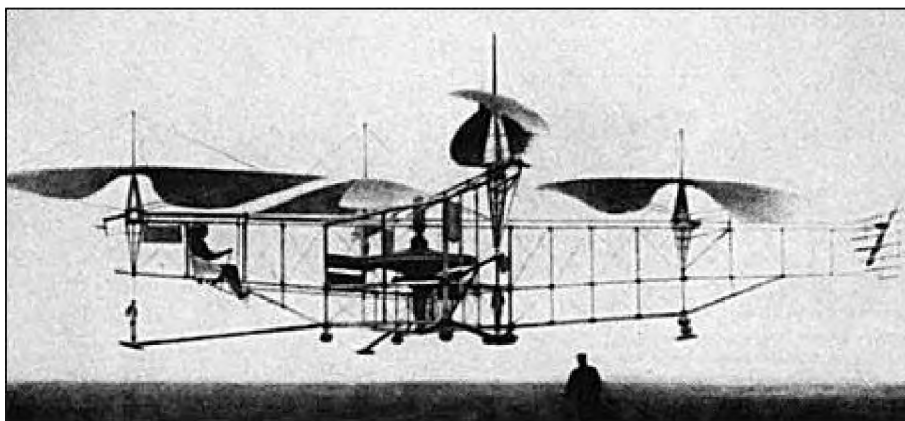


Рисунок 1.1 – Квадрокоптер Oehmichen № 2

Джордж де Ботеза та Іван Джером розробили гелікоптер де Ботеза з шестилопатеvimи гвинтами на кінці Х-подібної конструкції, наведено на рис. 1.2. Два невеликих гвинта зі змінним кроком використовувалися для управління тягою і поворотом. У транспортному засобі використовувався колективний тангаж. Побудований Повітряною службою армії Сполучених Штатів, він здійснив свій перший політ у жовтні 1922 року. До кінця 1923 року було здійснено близько 100 польотів. Максимальна висота, яку він коли-небудь досягав, становила близько 5 метрів (16 футів 5 дюймів). Незважаючи на те, що він продемонстрував здійсненність, він був недостатньо потужним, не реагував, механічно складний і сприйнятливий до проблем з надійністю. Робоче навантаження пілота було занадто високим під час висіння, щоб спробувати бічний рух.



Рисунок 1.2 - гелікоптер де Ботеза , фото 1923 р Доктор

У міжвоєнний період тривала розробка та випробування безпілотних літальних апаратів. У 1935 році англійці виготовили ряд радіокерованих літаків, які використовувалися як мішені для навчальних цілей. Вважається, що термін «дрон» почав використовуватися в цей час, навіяний назвою однієї з цих моделей, DH.82B Queen Bee. Радіокеровані дрони також виготовляли в Сполучених Штатах і використовували для стрільби та навчання. Розвідувальні БПЛА вперше були широко розгорнуті під час війни у В'єтнамі. Дрони також почали використовуватися в ряді нових ролей, таких як діяти як приманка в бою, запускати ракети по фіксованих цілях і скидати листівки для психологічних операцій. Після війни у В'єтнамі інші країни за межами Великобританії та Сполучених Штатів почали досліджувати технології безпілотних літальних апаратів. Ранні квадрокоптери, як правило, мали двигун, який знаходився десь у центрі фюзеляжу коптера, приводячи в рух 4 ротори через паси або вали. Однак ремені та вали важкі і, що важливо, можуть поламатися. Оскільки всі 4 ротори квадрокоптера дещо відрізняються один від одного, квадрокоптер не є природним стабільним, проста робота 4 роторів з однаковою швидкістю, створюючи підйомну силу, достатню для зависання коптера, НЕ забезпечує стабільний політ. Навпаки, квадрокоптери потрібно постійно стабілізувати. За відсутності комп'ютерів це означало монументальне навантаження для пілота. У результаті від проектів мультикоптерів відмовилися на користь однороторних або, у рідкісних випадках, для дуже великих транспортних гелікоптерів, двороторних. З появою електродвигунів і особливо мікроелектроніки та мікромеханічних пристроїв кілька років тому стало можливим створювати надійні та ефективні мультиротори. Сучасні мультикоптери мають електродвигун, з'єднаний з кожним ротором, розташований прямо під або над ним. Бортовий комп'ютер постійно стежить за орієнтацією коптера та коригує нестабільність, змінюючи не крок роторів, а просто оберти окремих двигунів/роторів. Нові моделі стали більш досконаліми, з покращеною витривалістю та можливістю утримувати більшу висоту. Приблизно з 2005 по 2010 рік прогрес в електроніці дозволив виробляти

дешеві легкі контролери польоту, акселерометри (IMU), глобальну систему позиціонування та камери. Це призвело до того, що конфігурація квадрокоптера стала популярною для малих безпілотних літальних апаратів. Завдяки невеликому розміру та маневреності ці квадрокоптери можна використовувати як у приміщенні, так і на вулиці. В останні роки були розроблені моделі, які використовують такі технології, як сонячна енергія, щоб вирішити проблему ‘заправки’ для тривалих рейсів [10].

1.2 Принцип дії квадрокоптерів

Мультикоптери мають три або більше гвинтів з постійним кутом атаки, кожен із яких приводиться в рух власним двигуном. Половина гвинтів обертається за годинниковою стрілкою, половина — у протилежному напрямку, взаємно компенсуючи обертання апарату навколо вертикальної осі. Мультикоптер маневрує шляхом зміни швидкості обертання гвинтів. Наприклад: збільшити оберти всіх гвинтів — вертикальний підйом; збільшити оберти з одного боку і зменшити з іншого — рух у бік; збільшити оберти, що обертаються за годинниковою стрілкою, і зменшити що обертаються проти — поворот. Квадрокоптери відрізняються розташуванням роторів відносно поздовжньої осі. Наприклад: конфігурація «+» — ротори спереду—ззаду, ліворуч—праворуч; конфігурація «X» — ротори діагонально попарно ліворуч та праворуч, схеми наведено на рис. 1.3 та 1.4 відповідно. В табл. 1.1 наведено залежність руху моторів до напрямку руху квадрокоптера.

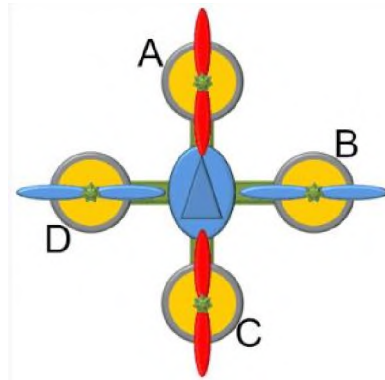


Рисунок 1.3 – конфігурація «+»

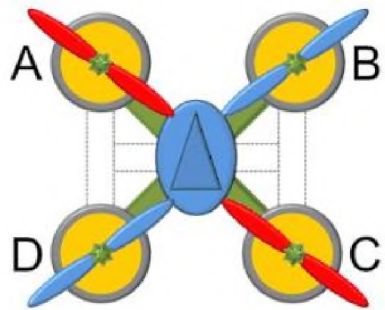


Рисунок 1.4 – конфігурація «x»

Таблиця 1.1- Конфігурація та схема керування

Конфігурація	зліт	зниження	обертання праворуч	обертання ліворуч	нахил вперед	нахил назад	нахил праворуч	нахил ліворуч
+	Оберти ABCD пропорці йно збільшит и	Оберти ABCD пропорці йно зменшит и	Оберти BD збільшит и та AC пропорці йно зменшит и	Оберти AC збільшит и та BD пропорці йно зменшит и	Оберти C збільшит и та A пропорці йно зменшит и	Оберти A збільшит и та C пропорці йно зменшит и	Оберти D збільшит и та B пропорці йно зменшит и	Оберти B збільшит и та D пропорці йно зменшит и
x	Оберти ABCD пропорці йно збільшит и	Оберти ABCD пропорці йно зменшит и	Оберти BD збільшит и та AC пропорці йно зменшит и	Оберти AC збільшит и та BD пропорці йно зменшит и	Оберти CD збільшит и та/або AB зменшит и	Оберти AB збільшит и та/або CD зменшит и	Оберти AD збільшит и та/або BC зменшит и	Оберти BC збільшит и та/або AD зменшит и

Для невеликих БПЛА конструкція квадрокоптера стала популярною, хоча ця схема рідко використовується для літаків з екіпажем. Мініатюризація означає, що можна використовувати менш потужні технології силових установок, які не підходять для літаків з екіпажем, наприклад невеликі електродвигуни та батареї.

1.3 Склад мультикоптера

Оскільки дрони є складними пристроями, алгоритми керування безпілотниками повинні враховувати компоненти, якими керують. На прикладі ми розглянемо структуру дрону на рис.1.5 [13].

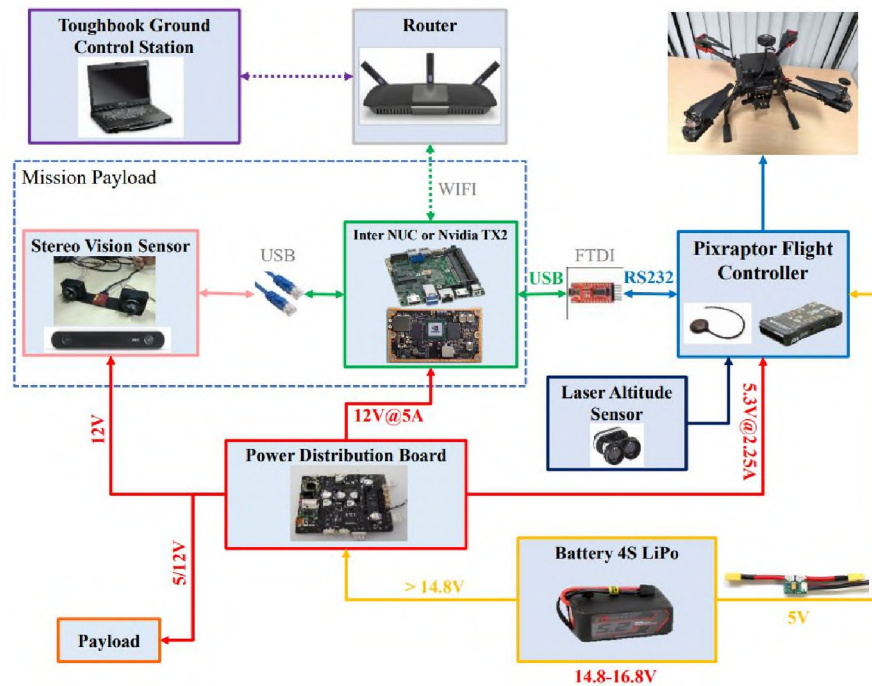


Рисунок 1.5 – Схема структури коптера та потрібних компонентів

Управління системою здійснюється мікропроцесором («мозком» пристрою), який перетворює сигнали від гіроскопа та радіопередавача в команди двигуна. Для забезпечення рівноваги та стабільного зависання в повітрі мультикоптер оснащений трьома гіроскопами. Контролюйте положення пристрою щодо крену, тангажу та обертання навколо вертикальної осі. Кожен гіроскоп миттєво реагує на найменше відхилення від осі регулювання і посилає сигнал на процесор, який через регулятор швидкості контролює обертання електродвигуна і забезпечує рівновагу пристрою в повітрі. Як допоміжні засоби можна використовувати акселерометри та барометри, сигнали яких дозволяють процесору фіксувати пристрій на потрібній висоті. Залежно від ваших потреб, пристрій також може бути оснащений GPS-приймачем, що дозволить вам задати автоматичний маршрут польоту з комп'ютера або повернути вертоліт у вихідну точку, якщо пропав радіосигнал управління. Гідролокатор використовується не тільки для обльоту перешкод, але і для автоматичної посадки та підтримки невеликої висоти.

1.4 Безпілотна аерозйомка. Перші успіхи

Новий розвиток мультиротори отримали вже зовсім недавно, і відразу з'явилися в якості дронів. До початку 2000-х, майже одночасно стали комерційно доступні асинхронні безколекторні електродвигуни, мікропроцесори, мікроелектромеханічні (МЕМС) гіроскопи та акселерометри, і нарешті, літій-полімерні батареї. Всі разом, ці технології зробили можливим появу малогабаритного, та не дуже коштовного мультироторного вертольота. Поява мультироторов стало проривом в області безпілотної аерозйомки. До цього моменту, основним засобом для отримання фото та відео з висоти, крім великої авіації, були повітряні змії, а так само авіамоделі літакового та класичного вертолітного типу. Моделі для повітряної зйомки будували здебільш технічно просунуті ентузіасти – аматори. Літаки були досить прості, але не дозволяли точно вибудувати кадр, бо не могли зависати у повітрі. Вертольоти, хоча і могли зависати, були дуже ненадійні, небезпечні, дуже вібрували та вимагали від дистанційного оператора серйозних навичок пілотування. Фактично цими літаючими моделями можна було гарно зняти тільки фото. Камера або жорстко закріплювалася на літак, або встановлювалася на погано працюючий стабілізуючий підвіс моделі вертольота. Надійного стабілізованого підвісу для відеокамер не було. Після зйомки відео вимагало великих зусиль по стабілізації на комп'ютері. [9]

1.5 Відродження мультироторов. Дрони для аерозйомки

Однією з перших компаній, що почали освоювати ринок квадрокоптерів, була німецька компанія Mikrokopter. Компанія була заснована в 2006 році. Вона виробляла комплект друкованих плат і базових компонентів для самостійної збірки багатороторних вертольотів. Виходячи з цього, просунуті ентузіасти-авіамоделісти можуть збирати, компонувати і налаштовувати літаючі багатогвинтові пристрої з цих вузлів, але це не складе особливих труднощів.

Автопілот був зібраний з трьох окремих плат, зібраних на стійках у вигляді книжкових полиць. Пайка вимагала значних навичок від радіомонтажників. Налаштування автопілота було складним і дуже погано задокументованим. Відомий вислів "Танці з бубном" як неможна краще підходило для опису цього процесу. Треба сказати, що в той час найпопулярнішим був не квадрокоптер, а гексакоптер. Причиною цього було те, що перші мультиротори були не дуже надійними, а контролер двигуна часто виходив з ладу. В середньому напрацювання на відмову складало всього кілька годин. Гексакоптери вважалися більш надійними в разі відмови одного двигуна. Якщо один з шести двигунів вийшов з ладу, був шанс посадити пристрій на решті п'ятьох двигунах. Квадрокоптер в такій ситуації неминуче розбивався. У той час не було рідкістю використання пластикового посуду та інших підручних засобів в якості корпусу, що закриває електронні компоненти дронів. У 2011 році американська компанія Freefly Systems випустила перший повністю укомплектований октокоптер. Продукт отримав назву CineStar 8 MultiRotor і призначався для професійної зйомки на малих висотах. Паралельно з розробкою власної платформи для польотів компанія Freefly Systems розробила підвіску для стабілізації легкого професійного кіно обладнання. Стабілізатор Podivis з'явився на ринку в 2013 році під назвою MVI® M10. Ця підвіска вже здатна стабілізувати камеру типу RedDragon.

1.6 Використання протоколів для керування

Управління безпілотником можливе лише за допомогою його передавача та приймача радіосигналу, що робить їх однаково важливими компонентами, схему наведено на рис. 1.6. Радіопередавач надсилає команди (такі як газ, нахил, крен і поворот), які потім фіксуються приймачем на квадрокоптері та передаються на автоматизований контролер польоту для обробки та виконання. Радіосистеми зазвичай працюють на частоті 2,4 ГГц, забезпечуючи баланс між діапазоном і проникненням сигналу, мінімізуючи перешкоди іншим

електронним пристроям. Використання нижчих частот, наприклад 900 МГц, у системах великої дальності може призвести до покращення діапазону і проникнення сигналу. Кількість каналів визначає кількість керуючих входів і допоміжних функцій, які може виконувати радіосистема. Базовий квадрокоптер має щонайменше чотири канали (дросьель, нахил, крен і поворот), але вони можуть мати додаткові канали для інших цілей, таких як регулювання камери, керування режимами польоту чи інших функцій. Протокол передачі даних відіграє роль у визначенні кількості каналів. Наприклад, протоколи, такі як PPM, SBUS, iBUS, CRSF, є цифровими і потребують лише одного каналу даних. Для забезпечення сумісності передавач і приймач повинні підтримувати загальний протокол. Є передавачі, які можуть підтримувати різні протоколи або можуть бути модифіковані для роботи з різними приймачами за допомогою зовнішніх модулів. Радіус дії радіосистеми визначає відстань, яку може пролетіти вертоліт, зберігаючи надійний зв'язок. Більшість систем з частотою 2,4 ГГц забезпечують діапазон 1-2 км, тоді як системи великого радіусу дії, такі як TBS Crossfire або FrSky R9, можуть досягати значно більших відстаней (понад 10 кілометрів). Іншим параметром радіосистеми є затримка між введенням пілотом інформації в передавач і відповіддю квадрокоптера. Низька затримка забезпечує кращий контроль над квадрокоптером. Цифрові протоколи зв'язку, такі як SBUS, iBUS або Crossfire, забезпечують меншу затримку, ніж аналогові протоколи, такі як PPM [15].

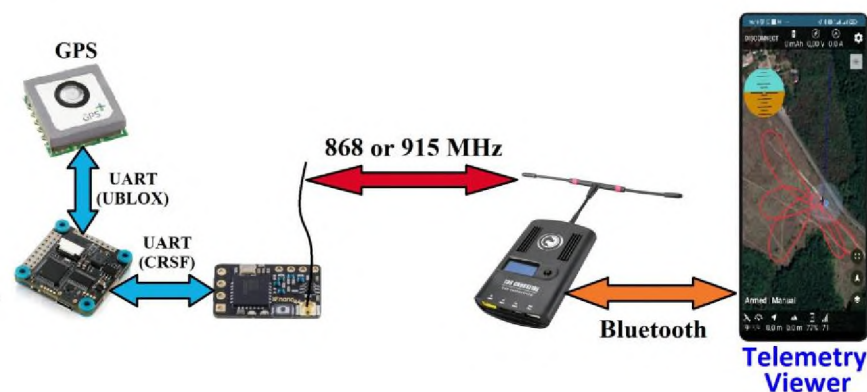


Рисунок 1.6 – Принцип зв'язку

Не менш важливими компонентами є антени. Їх функція полягає в передачі та прийомі радіочастотних сигналів. Вибір правильної антени може значно змінити радіус дії, якість сигналу та загальну продуктивність вашого дрона. Частота антени має збігатися з частотою, яку використовують передавач і приймач. Більшість систем радіоуправління працюють на частоті 2,4 ГГц, тоді як системи передачі відео (FPV) використовують частоти 5,8– ГГц або іноді нижчі, наприклад 1,2. ГГц або 2,4 ГГц. Антена може мати лінійну або кругову поляризацію. Лінійно поляризовані антени (наприклад, дипольні або монопольні) прості та недорогі, але їх продуктивність може бути значно погіршена багатопроменевими перешкодами. Багатопроменеву перешкоду можна ефективніше регулювати за допомогою антен із круговою поляризацією, таких як лист конюшини або копланарне колесо. Антена з круговою поляризацією може мати ліву або праву поляризацію. Щоб дозволити оператору керувати дроном, а також спілкуватися між внутрішніми компонентами квадрокоптера, існує багато доступних протоколів зв'язку. Давайте коротко розглянемо поширені типи. [18]

DSM2 (Digital Spectrum Modulation 2) і DSPX (Digital Signal Processing eXtended) є двома прикладами модуляції цифрового спектру. DSM2 і DSMX широко використовуються радіопротоколи для передавачів і приймачів 2,4 ГГц. Він також використовується в проекті SuperbitRF як канал передачі даних. Протокол дає можливість мати декілька приймачів/передавачів у діапазоні 2,4 ГГц без особливих перешкод. сигнал DSM2 стійкий до шуму, перешкод та інших передавачів, що передають на тій же частоті. Він також знаходить резервну частоту під час запуску на випадок збою основної частоти. Це значно зменшує ймовірність втрати сигналу, однак, якщо обидва канали стануть непридатними, ви все одно можете втратити з'єднання. DSMX базується на DSM2, який також використовує таку саму схему кодування, і вдосконалено його. Різниця полягає в тому, що сигнал DSMX здатний переключатися на новий частотний канал у разі відключення протягом кількох мілісекунд, тому

теоретично ви навіть не помітите збій. DSMX забезпечує кращу перешкодостійкість, ніж DSM2, завдяки використанню більшої кількості каналів і швидшому стрибку частоти.

FrSky ACCST (Advanced Continuous Channel Switching Technology). Цей протокол використовують передавачі та приймачі FrSky, він не залежить від несучої частоти. Більшість приймачів FrSky використовують 2,4 ГГц. Протокол використовує стрибкоподібну зміну частоти для підвищення надійності сигналу. Він безперервно, багато разів на секунду, змінює канал прийомопередавача, забезпечуючи високу стійкість до можливих перешкод передачі. FrSky ACCST зазвичай використовується пілотами квадрокоптерів через його здатність забезпечувати радіокерування з низькою затримкою, високою роздільною здатністю та телеметрією.

FrSky ACCESS (Advanced Communication Control Elevated Spread Spectrum) — це подібно до ACCST, протокол радіозв'язку модулів передавача та приймача FrSky, дальність керування та телеметрії збільшена на 40% (порівняно з ACCST). Приймачі ACCST, що працюють у режимі D16, можуть підтримувати до 16 каналів. ACCESS розширює можливості до 24 каналів. Протокол ACCESS зменшує затримки передачі (вимірюються наскрізно, тобто від моменту фіксації до моменту, коли сигнал керування надсилається на сервопривід або контролер польоту).

TBS Crossfire — це протокол радіоуправління великої дальності, розроблений Team BlackSheep (TBS), який працює в діапазоні частот 915 МГц (США) або 868 МГц (Європа). Використовуючи нижчу частоту, ніж традиційні системи 2,4 ГГц, Crossfire забезпечує кращий діапазон і передачу сигналу, що робить його ідеальним для далеких польотів і польотів у скупченій середовищі.

FlySky AFHDS/AFHDS 2A (цифрова система автоматичного стрибкоподібного перемикачання частоти) — протокол керування

радіостанціями FlySky використовує стрибкоподібне перемикання частоти та двонаправлений зв'язок для забезпечення надійного з'єднання між передавачем і приймачем. AFHDS 2A — це вдосконалена версія оригінального AFHDS із додатковими перевагами, покращення затримки, роздільної здатності та телеметрії, порівняно з оригінальним протоколом.

Futaba пропонує декілька протоколів радіокерування, зокрема FASST (Futaba Advanced Spread Spectrum Technology), S-FHSS (Super Futaba High Speed Spread Spectrum) і T-FHSS (Telemetry Futaba High-Speed Spread Spectrum). Технологія стрибків частоти та розширення спектру є основними компонентами цих протоколів, а через T-FHSS пропонують можливості телеметрії.

Вбудована телеметрична функція протоколу Graupner HoTT на основі FHSS дозволяє пілотам контролювати низку даних, включаючи напругу акумулятора, температуру та інформацію GPS у реальному часі.

Під час вибору протоколу радіокерування слід враховувати такі фактори, як сумісність передавача та приймача, затримка, роздільна здатність сигналу, можливості телеметрії та спеціальні вимоги до конструкції квадрокоптерів. Плюси та мінуси кожного протоколу залежать від цільового використання квадрокоптера. Протоколи контролера-приймача є середовищем зв'язку, яке використовується для передачі сигналів керування від радіоприймача до польотного контролера квадрокоптера. Ці протоколи дозволяють оператору польоту інтерпретувати вхідні дані пілота з радіопередавача та виконувати відповідні команди для керування рухами квадрокоптера, дроселем та допоміжними функціями.

1.7 Протоколи «приймач-контролер»

Нижче наведено огляд деяких поширених протоколів «приймач – контролер польоту». На відміну від зв'язку між TX і RX, зв'язок між RX і FC є дротовим. Бажано, щоб протокол мав низьку затримку. Затримка – це, по суті,

час, який потрібен приймачу, щоб «перевести» сигнал від передавача в сигнал, який він збирається надіслати до диспетчера польоту. Менша затримка означає, що ваш квадрокоптер швидше реагуватиме на ваші вказівки. Деякі протоколи RX є універсальними та використовуються в приймачах різних виробників, але деякі можуть бути ексклюзивними для певних марок. Ось список поширених протоколів RX:

PWM (Pulse Width Modulation)/ШИМ (широко-імпульсна модуляція) є одним з найпростіших і найпоширеніших методів передачі даних між приймачем (RX) та контролером польоту (FC) у дронах, схему підключення наведено на рис. 1.7. Принцип роботи PWM базується на зміні ширини імпульсів сигналу для передачі інформації. Кожен канал приймача генерує прямокутний імпульсний сигнал з постійною частотою, зазвичай 50 Гц (період 20 мс). Інформація передається шляхом зміни ширини (тривалості) імпульсу. Ширина імпульсу зазвичай варіюється від 1 мс до 2 мс, де 1 мс відповідає мінімальному значенню команди (наприклад, 0% газу), а 2 мс відповідає максимальному значенню (наприклад, 100% газу). Контролер польоту отримує імпульсний сигнал з кожного каналу і вимірює його ширину. На основі виміряної ширини імпульсу контролер польоту визначає відповідне значення команди, наприклад, положення руків'я керування на пульті. Далі контролер польоту інтерпретує отримані команди і виконує відповідні дії, такі як зміна швидкості обертання моторів, керування стабілізацією дрону, зміна кута нахилу та інших параметрів польоту. Протокол PWM має свої переваги та недоліки. Серед переваг слід відзначити простоту реалізації, яка робить його популярним у багатьох системах, та надійність, яка забезпечує стабільну роботу у різних умовах. Однак протокол має обмежену швидкість передачі даних через частоту 50 Гц, що може призводити до затримок у виконанні команд. Крім того, для кожного каналу потрібен окремий провід, що може ускладнювати підключення та збільшувати вагу системи. PWM сигнали також можуть бути чутливими до перешкод і шумів, що впливає на точність передачі команд. Попри недоліки,

протокол PWM залишається популярним у багатьох додатках завдяки своїй простоті та надійності. Сучасні цифрові протоколи, такі як SBUS, iBUS та інші, часто переважають у новіших системах через їх більшу швидкість передачі даних та зручність використання[20].

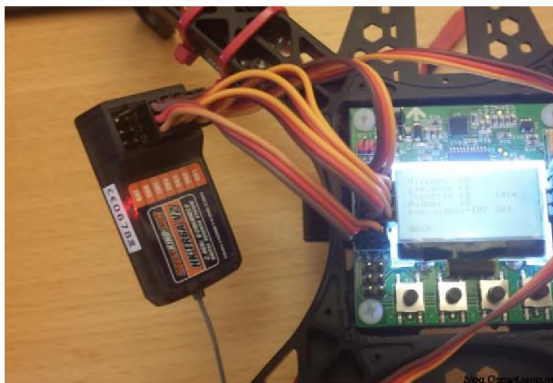


Рисунок 1.7 – Дротове з'єднання для протоколу ШІМ

PPM (Pulse Position Modulation/ імпульсно-позиційна модуляція) є одним з методів передачі даних між приймачем (RX) та контролером польоту (FC) у дронах, схему з'єднання наведено на рис. 1.8. Принцип роботи PPM базується на зміні положення імпульсів для передачі інформації, що дозволяє використовувати один сигнал для передачі даних з кількох каналів. PPM сигнал складається з серії імпульсів, де кожен імпульс представляє значення одного каналу. Кожен канал генерує імпульс з фіксованою шириною, а інформація передається шляхом зміни інтервалу між початком одного імпульсу і початком наступного. Інтервали між імпульсами варіюються залежно від команди, яку необхідно передати. Контролер польоту отримує PPM сигнал і декодує його, вимірюючи інтервали між імпульсами. На основі цих вимірювань контролер польоту визначає відповідні значення команд для кожного каналу. Далі ці команди використовуються для керування дронами, таких як зміна швидкості обертання моторів, керування стабілізацією дрону, зміна кута нахилу та інших параметрів польоту. Протокол PPM має свої переваги та недоліки. Однією з основних переваг є зменшення кількості необхідних проводів, оскільки всі канали передаються через один сигнал. Це спрощує підключення і зменшує

вагу системи. Крім того, PPM забезпечує простоту інсталяції та налаштування. Однак, протокол PPM має більшу затримку у порівнянні з сучаснішими цифровими протоколами, що може впливати на швидкість реакції системи. Також PPM сигнали можуть бути схильні до перешкод і шумів, що може впливати на точність передачі команд. Протокол PPM залишається популярним у багатьох додатках завдяки своїй простоті та ефективності. Хоча сучасні цифрові протоколи, такі як SBUS, iBUS та інші, часто переважають у новіших системах через їх більшу швидкість передачі даних та зручність використання, PPM все ще залишається актуальним для багатьох користувачів, які цінують простоту та надійність.



Рисунок 1.8 – Дротове з'єднання протоколу PPM

Протокол SBUS (Serial Bus) є одним із сучасних цифрових протоколів для передачі даних між приймачем (RX) та контролером польоту (FC) у дронах. Розроблений компанією Futaba, SBUS забезпечує високу швидкість передачі даних і підтримує велику кількість каналів, що робить його популярним серед користувачів дронів. SBUS використовує цифровий сигнал для передачі даних з усіх каналів через один провід. Дані передаються у вигляді послідовного потоку байтів. Протокол працює на високій швидкості передачі даних, зазвичай 100 кбіт/с, що забезпечує низьку затримку і швидку реакцію на команди. SBUS підтримує до 16 каналів, що дозволяє передавати більше інформації у порівнянні з традиційними аналоговими протоколами. Додатково підтримуються канали для телеметрії та зворотного зв'язку. Контролер польоту

отримує SBUS сигнал і декодує його для отримання значень команд для кожного каналу. Це дозволяє контролеру польоту швидко реагувати на зміни у командах і відповідно керувати дроном. Використання одного проводу для передачі всіх даних зменшує вагу і спрощує підключення, що є однією з важливих переваг SBUS. Серед переваг SBUS слід відзначити високу швидкість передачі даних, що забезпечує низьку затримку і швидку реакцію на команди, що важливо для керування дронами. Підтримка до 16 каналів дозволяє передавати більше інформації, що підвищує функціональність системи. Використання одного проводу для передачі всіх даних зменшує вагу і спрощує підключення. Проте SBUS має і деякі недоліки. Він сумісний тільки з певними приймачами та контролерами польоту, що може обмежувати вибір обладнання. Крім того, налаштування SBUS може вимагати додаткових конфігурацій для правильної роботи з різними системами. SBUS використовується у складних і високотехнологічних дронах, де важлива швидка і точна передача даних. Він підходить для систем, які потребують велику кількість каналів для керування різними функціями дрона, такими як стабілізація, телеметрія, управління камерою та інше. Завдяки високій швидкості передачі даних і низькій затримці, SBUS є оптимальним вибором для професійних і високопродуктивних дронів.

CRSF використовує послідовний цифровий сигнал для передачі даних з усіх каналів через один провід. Дані передаються у вигляді послідовного потоку байтів, що дозволяє передавати інформацію з багатьох каналів одночасно. Завдяки цифровому сигналу, CRSF забезпечує високу точність і надійність передачі даних. Протокол працює на високій швидкості передачі даних, що забезпечує мінімальну затримку сигналу, зазвичай менше 10 мс, що критично для точного керування дронами. CRSF підтримує до 16 каналів, що дозволяє керувати багатьма функціями дрона, такими як стабілізація, управління камерою, телеметрія та інші. Контролер польоту отримує CRSF сигнал і декодує його для отримання значень команд для кожного каналу, що дозволяє швидко реагувати на зміни у командах. Протокол забезпечує дуже

низьку затримку передачі сигналу, що є важливим для професійного та спортивного використання дронів. CRSF також відомий своєю великою дальністю зв'язку, що може досягати кількох десятків кілометрів залежно від умов і використовуваного обладнання. Це робить його ідеальним для використання в середовищах з великою відстанню між пілотом та дроном. CRSF використовує спеціально розроблений формат даних, що включає інформацію про положення всіх каналів, телеметричні дані та інші команди. Дані передаються у вигляді пакетів, що містять інформацію про всі канали одночасно, зменшуючи затримку і забезпечуючи високу точність передачі даних. Протокол підтримує двосторонню комунікацію, що дозволяє не тільки передавати команди від пілота до дрона, але й отримувати зворотний зв'язок від дрона до пілота, включаючи телеметричні дані, такі як стан батареї, висота, швидкість, та інші важливі параметри. Завдяки високій швидкості передачі даних, великій дальності зв'язку і низькій затримці, CRSF є оптимальним вибором для професійних пілотів дронів, забезпечуючи надійність та ефективність роботи в різних умовах.

iBUS (FlySky iBUS) є сучасним цифровим протоколом для передачі даних між приймачем (RX) та контролером польоту (FC) у дронах. Розроблений компанією FlySky, iBUS забезпечує надійну і швидку передачу даних, підтримує велику кількість каналів та має високу стійкість до перешкод. Протокол iBUS використовує послідовний цифровий сигнал для передачі даних з усіх каналів через один провід. Дані передаються у вигляді послідовного потоку байтів, що дозволяє передавати інформацію з багатьох каналів одночасно. iBUS працює на високій швидкості передачі даних, зазвичай 115200 біт/с, що забезпечує низьку затримку і швидку реакцію на команди, що є критично важливим для керування дронами. Протокол підтримує до 18 каналів, що дозволяє передавати більше інформації у порівнянні з аналоговими протоколами. Це дає можливість керувати більшою кількістю функцій дрона, таких як стабілізація, управління камерою, телеметрія та інші. Контролер

польоту отримує iBUS сигнал і декодує його для отримання значень команд для кожного каналу. Це дозволяє контролеру польоту швидко реагувати на зміни у командах і відповідно керувати дроном. Цифровий характер сигналу iBUS робить його менш схильним до перешкод у порівнянні з аналоговими протоколами, що забезпечує високу надійність і точність передачі даних навіть в умовах сильної радіоперешкоди. Серед переваг iBUS слід відзначити високу швидкість передачі даних, що забезпечує низьку затримку і швидку реакцію на команди, що є важливим для керування дронами. Підтримка до 18 каналів дозволяє передавати більше інформації, що підвищує функціональність системи. Використання одного проводу для передачі всіх даних зменшує вагу і спрощує підключення. Цифровий характер сигналу забезпечує високу надійність і точність передачі даних навіть в умовах сильної радіоперешкоди. Проте iBUS має і деякі недоліки. Він сумісний тільки з певними приймачами та контролерами польоту, що може обмежувати вибір обладнання. Крім того, налаштування iBUS може вимагати додаткових конфігурацій для правильної роботи з різними системами. iBUS використовується у складних і високотехнологічних дронах, де важлива швидка і точна передача даних. Він підходить для систем, які потребують велику кількість каналів для керування різними функціями дрона, такими як стабілізація, телеметрія, управління камерою та інше. Завдяки високій швидкості передачі даних і низькій затримці, iBUS є оптимальним вибором для професійних і високопродуктивних дронів, забезпечуючи надійність та ефективність роботи в різних умовах. XBUS

XBUS використовується компанією JR, яка підтримує до 14 каналів в одному сигнальному дроті. Однією з переваг є невелика затримка між кожним каналом.

Протокол MAVLink (Micro Air Vehicle Link) — це двосторонній послідовний протокол, що використовує послідовні інтерфейси UART, USB, SPI та інші для передачі даних між різними компонентами дрона, включаючи автопілоти, наземні станції, сенсори та інші периферійні пристрої. MAVLink

використовує систему пакетної передачі даних, де кожен пакет містить інформацію про тип повідомлення, ідентифікатори відправника та отримувача, а також корисні дані [17].

1.8 Протоколи ESC

Протоколи зв'язку ESC – це методи, які використовує контролер польоту для зв'язку з ESC у квадрокоптері. Ці протоколи дозволяють контролеру польоту надсилати команди на ESC, які, у свою чергу, контролюють швидкість і напрямок двигунів. Для цього можна використовувати PWM, OneShot125, OneShot42, MultiShot, DShot. Усі ці протоколи є аналоговими сигналами, подібними до стандартних ШИМ, але набагато швидшими (з меншою затримкою). Ці протоколи синхронізуються з контуром PID (пропорційно-інтегральнодиференціальний) у контролері польоту, щоб зменшити затримку та підвищити продуктивність.

OneShot125 — це цифровий протокол, створений для покращення реакції ESC та зменшення затримки порівняно з ШИМ. Він передає команди до ESC в 8 разів швидше, ніж стандартна ШИМ, що дозволяє швидше змінювати швидкість двигуна та покращувати льотні характеристики. Хоча OneShot125 підтримується багатьма ESC і контролерами польоту, його значною мірою замінили новіші та швидші цифрові протоколи.

OneShot42 — це швидша версія OneShot125, яка забезпечує ще меншу затримку та покращену реакцію ESC. Він передає команди до ESC зі швидкістю, що в 32 рази перевищує стандартну ШИМ. Незважаючи на те, що OneShot42 має кращу продуктивність порівняно з OneShot125, він використовується рідше та значною мірою був замінений вдосконаленим протоколом DShot.

MultiShot — це ще один цифровий протокол, заснований на концепціях OneShot125 і OneShot42. Він забезпечує меншу затримку та швидшу реакцію

двигуна порівняно з OneShot125 і OneShot42. MultiShot динамічно регулює швидкість сигналу відповідно до потреб ESC, що забезпечує більш точне та ефективне керування двигуном.

DShot — це цифровий протокол, який використовує пакетну передачу даних для більш точного та надійного керування ESC. На відміну від протоколів PWM і OneShot, що залежать від ширини імпульсу, DShot надсилає дискретні цифрові команди до регуляторів, що робить його більш стійким до електричних перешкод і забезпечує краще керування двигуном. DShot доступний у різних варіантах швидкості, таких як DShot150, DShot300, DShot600 і DShot1200, причому більші значення відповідають вищій швидкості зв'язку.

Протоколи типу Shot — це методи зв'язку між контролером польоту та електронними контролерами швидкості (ESC) у квадрокоптері. Вони розроблені для покращення точності керування та зменшення затримки порівняно зі старішим протоколом PWM. OneShot працює надсилаючи коротші та швидші імпульсні сигнали від контролера польоту до ESC. У стандартному протоколі PWM ширина імпульсу зазвичай коливається від 1000 мкс до 2000 мкс для відображення мінімального та максимального значення дроселя, а оновлення відбуваються з частотою 50 Гц (кожні 20 мілісекунд). У протоколі OneShot ці імпульси скорочуються у 8 разів, що призводить до імпульсів у діапазоні від 125 мкс до 250 мкс. Швидкість оновлення також збільшується, забезпечуючи швидший зв'язок між контролером польоту та ESC. Оскільки OneShot надсилає команди з вищою швидкістю, ніж PWM, це дозволяє швидше змінювати швидкість двигуна, що покращує польотні характеристики та стабільність.

Щоб використовувати протокол OneShot, мікропрограма польотного контролера та мікропрограма ESC повинні його підтримувати. При правильній конфігурації OneShot може забезпечити кращий контроль над двигунами

квадрокоптера, що забезпечує більш плавні та точні характеристики польоту. У дронах для обміну даними між компонентами, такими як контролер польоту, GPS, компас та інші датчики, використовуються різні протоколи зв'язку для датчиків і периферійних пристроїв. Ці протоколи забезпечують ефективний і надійний зв'язок, що дозволяє безпілотнику працювати належним чином та підтримувати стабільний політ[19].

1.9 Популярні внутрішні протоколи зв'язку

1.9.1 UART (універсальний асинхронний приймач/передавач) — це широко використовуваний послідовний протокол зв'язку, який забезпечує обмін даними між пристроями, такими як мікроконтролери, датчики та периферійні пристрої. У контексті дронів UART зазвичай використовується для підключення модулів GPS, телеметричних радіостанцій та інших периферійних пристроїв до контролера польоту.

Ключові функції цього протоколу:

Відсутність необхідності у спільному тактовому сигналі: UART не потребує спільного тактового сигналу між пристроями, що спрощує процес зв'язку. Дані передаються з використанням попередньо визначеної швидкості передачі (біт на секунду), яка має бути однаковою для відправника та одержувача.

Двонаправлений зв'язок: UART використовує дві лінії даних для зв'язку: TX (передавання) і RX (отримання). Це забезпечує двонаправлений зв'язок між пристроями, причому кожен пристрій має свою лінію TX і RX, схема підключення наведена на рис. 1.9.

Пакетна передача даних: UART передає дані в пакетах або кадрах, які складаються з початкового біта, попередньо визначеної кількості бітів даних (зазвичай 8 бітів), додаткового біта парності для виявлення помилок і одного

або кількох стоп-бітів. Така структура кадрів забезпечує надійну передачу даних і допомагає одержувачу визначити початок і кінець кожного пакета даних.

Простота реалізації: UART відносно просто реалізувати в апаратному забезпеченні, що робить його популярним вибором для зв'язку між мікроконтролерами та різними периферійними пристроями. Багато мікроконтролерів, включаючи ті, що використовуються в контролерах польоту, мають вбудовані інтерфейси UART.

Підтримка кількох портів: Деякі контролери польоту мають кілька портів UART, що дозволяє їм спілкуватися з декількома периферійними пристроями одночасно. Це корисно для дронів, які потребують зв'язку з декількома пристроями, такими як GPS, телеметрія та відеопередавачі.

Під час використання UART у дроні важливо переконатися, що відправник і одержувач мають однакову швидкість передачі даних і параметри кадру даних. Крім того, при підключенні пристроїв лінія TX одного пристрою повинна бути підключена до лінії RX іншого пристрою, і навпаки.

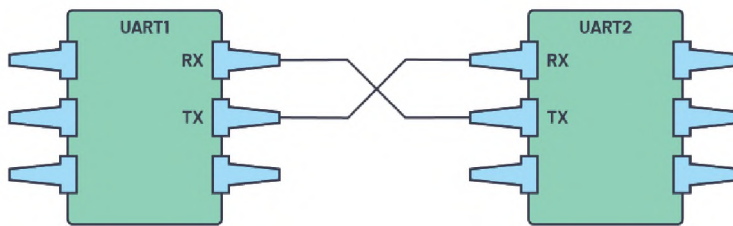


Рисунок 1.9 - Два UART спілкуються між собою

Два сигнали кожного пристрою UART називаються:

- Передавач (Tx)
- Приймач (Rx)

У послідовному зв'язку UART, схему наведено на рис. 1.10, дані передаються асинхронно, тобто між відправником і одержувачем немає годинника чи іншого сигналу синхронізації. Замість тактового сигналу UART використовує деякі спеціальні біти, які називаються бітами Start і Stop. Ці біти додаються до фактичного пакету даних на початку та в кінці відповідно. Ці додаткові біти дозволяють приймаючому UART ідентифікувати фактичні дані.

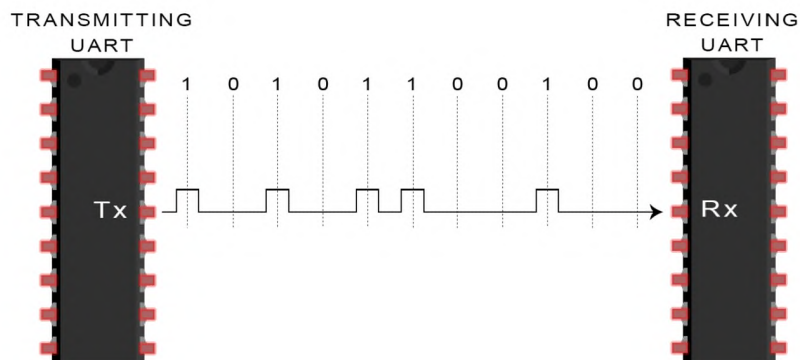


Рисунок 1.10 – Схема послідовного надсилання пакету від передаючого UART до приймаючого UART

На зображенні вище показано типове підключення UART. Передавальний UART отримує дані від керуючого пристрою через шину даних. Керуючим пристроєм може бути будь-що на кшталт центрального процесора мікропроцесора або мікроконтролера, блока пам'яті, такого як RAM або ROM тощо. Дані, отримані передавальним UART від шини даних, є паралельними даними. До цих даних UART додає біти Start, Parity та Stop, щоб перетворити їх у пакет даних, можемо побачити це на рис. 1.11.

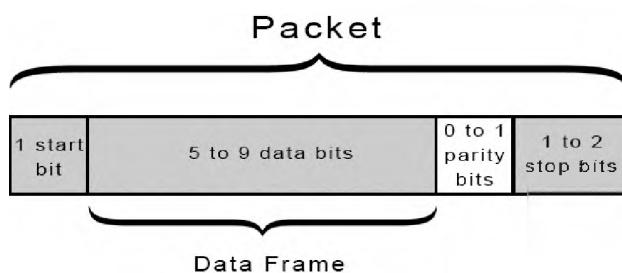


Рисунок 1.11 – Організований пакет даних

Пакет даних потім перетворюється з паралельного на послідовний за допомогою регістра зсуву і передається побітно з виводу TX. Приймаючий UART отримує ці послідовні дані на виводі RX і виявляє фактичні дані, ідентифікуючи початкові та стопові біти. Біт парності використовується для перевірки цілісності даних. Після виділення початкового, паритетного та стопового бітів із пакету даних дані перетворюються на паралельні дані за допомогою регістра зсуву. Ці паралельні дані надсилаються до контролера на приймальному кінці через шину даних, схему наведено на рис. 1.12 [21].

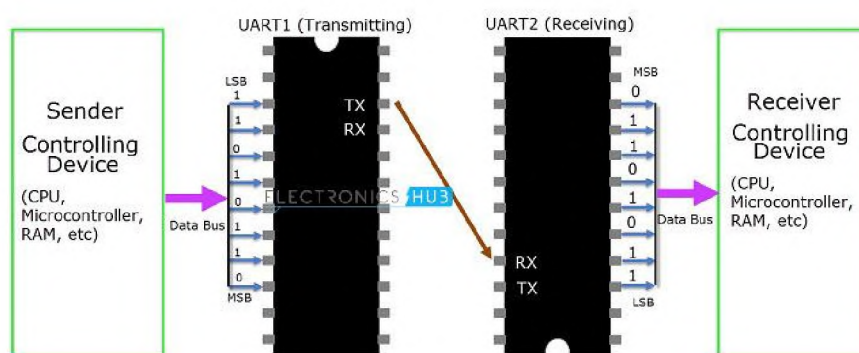


Рисунок 1.12 – Передача даних від контролера до контролера через UART.

1.9.2 I2C (Inter-Integrated Circuit) — це синхронний послідовний протокол зв'язку, який дозволяє кільком пристроям обмінюватися даними через двопровідну шину. У дронах I2C зазвичай використовується для підключення датчиків, таких як барометри, магнітометри (компаси) і зовнішні контролери, до контролера польоту.

I2C використовує два дроти для зв'язку: SDA (Serial Data) і SCL (Serial Clock). SDA (послідовні дані) — лінія для головного та підлеглої пристроїв для надсилання та отримання даних, схему наведено на рис. 1.13. SCL (послідовний годинник) — лінія, яка передає сигнал синхронізації.

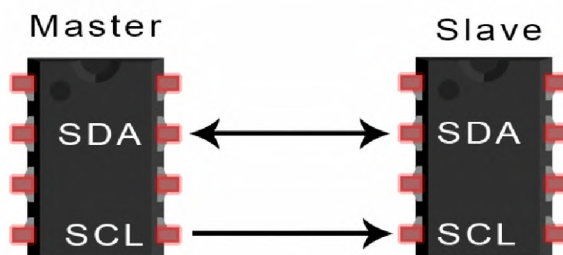


Рисунок 1.13 – Передача даних побітово, по одому дроту (лінія SDA)

Це робить I2C ефективним і простим протоколом для підключення кількох пристроїв, мінімізуючи кількість необхідних з'єднань. На відміну від UART, I2C є синхронним протоколом, тобто він використовує спільний тактовий сигнал (SCL) для синхронізації передачі даних між пристроями, що дозволяє більш точно контролювати час передачі даних.

За допомогою I2C дані передаються в повідомленнях, схему наведено на рис. 1.14. Повідомлення розбиваються на кадри даних. Кожне повідомлення має кадр адреси, який містить двійкову адресу підлеглого пристрою, і один або кілька кадрів даних, які містять дані, що передаються. Повідомлення також містить умови запуску та зупинки, біти читання/запису та біти ACK/NACK між кожним кадром даних.

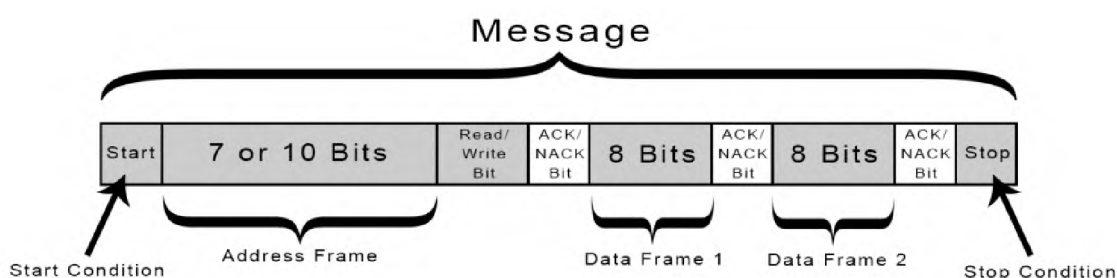


Рисунок 1.14 – Схема передачі даних I2C.

I2C підтримує кілька головних і підлеглих пристроїв на одній шині, створюючи складні комунікаційні мережі. Кожен пристрій на шині має унікальну адресу, яка використовується для спрямування зв'язку між пристроями.

Зв'язок по шині I2C ініціюється головним пристроєм, який надсилає умову START, за якою слідує 7-бітна адреса цільового підлеглого пристрою та біт читання/запису. Потім підлеглий пристрій підтверджує запит, і починається передача даних. Дані передаються 8-бітними порціями, за кожним байтом слідує біт підтвердження від приймального пристрою. Зв'язок припиняється умовою STOP, надісланою головним пристроєм.

I2C підтримує різні режими швидкості, включаючи стандартний режим (100 Кбіт/с), швидкий режим (400 Кбіт/с) і високошвидкісний режим (3,4 Мбіт/с). Відстань зв'язку зазвичай обмежена кількома метрами, що робить I2C придатним для зв'язку на короткій відстані між пристроями на одній платі або в одній невеликій системі.

Оскільки I2C використовує адресацію, кількома підлеглими можна керувати з одного головного, схему керування наведено на рис. 1.15. З 7-бітовою адресою доступно 128 (2^7) унікальних адрес. Використання 10-бітових адрес є рідкісним, але забезпечує 1024 (2^{10}) унікальних адрес. Щоб підключити кілька підлеглих пристроїв до одного головного, підключіть їх таким чином, за допомогою підтягувальних резисторів 4,7 КОм, які підключають лінії SDA та SCL до Vcc:

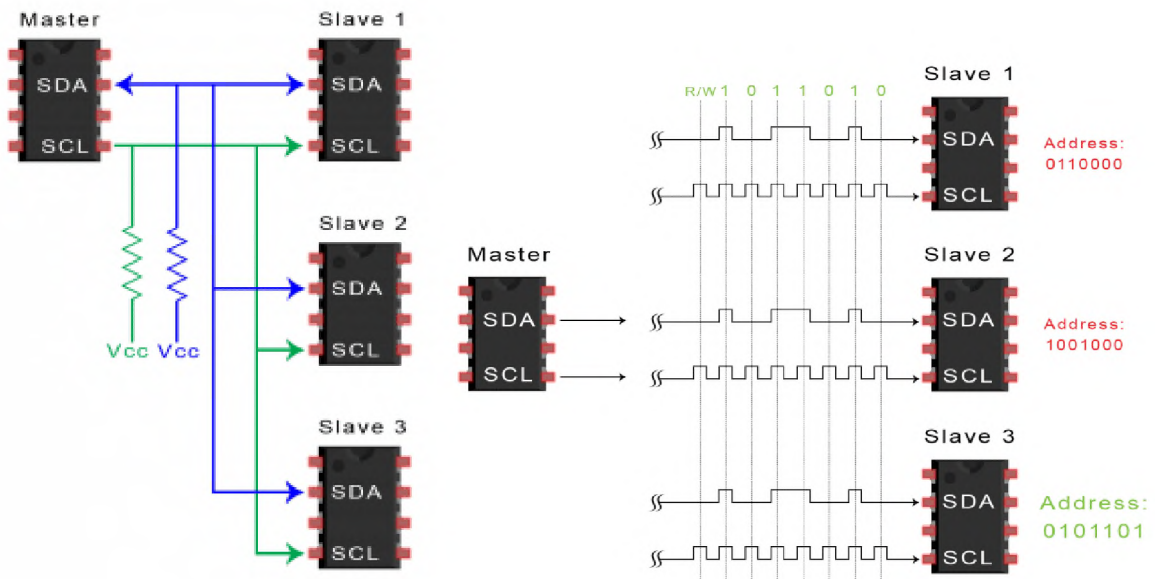


Рисунок 1.15 – Схема «один господар із кількома підлеглими»

Після передачі кожного кадру даних приймаючий пристрій повертає відправнику інший біт АСК для підтвердження успішного отримання кадру, можемо побачити схему на рис. 1.16.

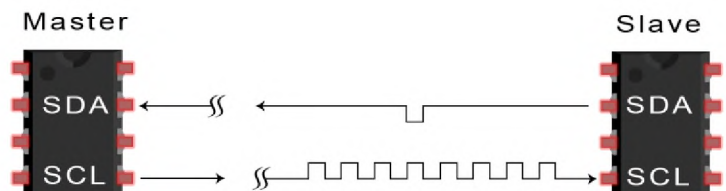


Рисунок 1.16 – Схема повернення біт від приймача

Також кілька головних пристроїв можуть бути підключені до одного або кількох підлеглих пристроїв. Проблема з кількома головними в одній системі виникає, коли два головні намагаються надіслати або отримати дані одночасно через лінію SDA. Щоб вирішити цю проблему, перед передачею повідомлення кожен майстер повинен визначити, чи є лінія SDA низьким або високим. Якщо лінія SDA низька, це означає, що інший головний має контроль над шиною, і головний повинен чекати, щоб надіслати повідомлення. Якщо лінія SDA

висока, то передати повідомлення безпечно. Щоб підключити кілька головних пристроїв до кількох підлеглих, скористайтеся наступною схемою, наведену на рис. 1.17, з підтягуючими резисторами 4,7 КОм, які підключають лінії SDA та SCL до Vcc:

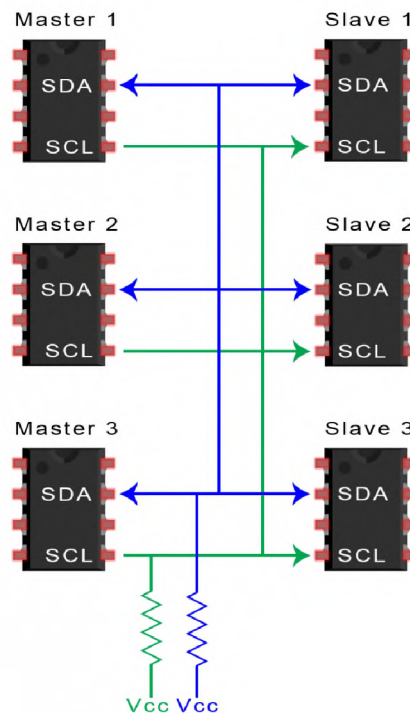


Рисунок 1.17 – Схема «кілька господарів із кількома підлеглими»

Під час використання I2C у дронах важливо переконатися, що всі пристрої на шині мають унікальні адреси та сумісні з вибраним режимом швидкості. Крім того, для підтримки цілісності сигналу на лініях SDA та SCL слід використовувати належні підтягуючі резистори [22].

1.9.3 SPI (Serial Peripheral Interface) — це синхронний послідовний протокол зв'язку, який забезпечує високошвидкісний обмін даними між мікроконтролерами та периферійними пристроями, такими як датчики, SD-карти та модулі відображення.

SPI це «синхронна» шина даних, що означає, що вона використовує окремі лінії для даних і «годинник», який підтримує ідеальну синхронізацію

обох сторін, схему наведено на рис. 1.18. Годинник — це коливальний сигнал, який точно вказує приймачу, коли потрібно дискретизувати біти на лінії даних. Це може бути висхідний (від низького до високого) або спадаючий (від високого до низького) фронт тактового сигналу; у таблиці даних буде вказано, який з них використовувати. Коли приймач виявляє цей край, він негайно дивиться на лінію даних, щоб прочитати наступний біт (див. стрілки на діаграмі нижче). Оскільки годинник надсилається разом із даними, визначення швидкості не є важливим, хоча пристрої матимуть максимальну швидкість, з якою вони можуть працювати.

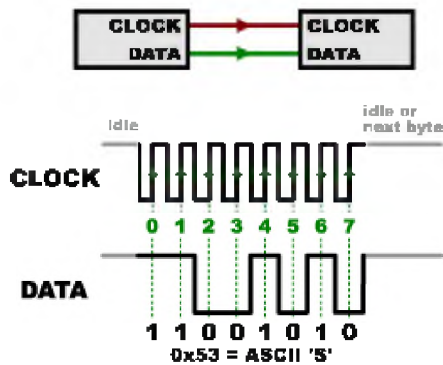


Рисунок 1.18 – Синхронне рішення

SPI використовує чотири дроти для зв'язку: MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out), SCK (Serial Clock) і CS (Chip Select), нові назви дротів наведено на рис. 1.19.

Obsolete Name	Replacement Name
Master	Controller
Slave	Peripheral
MISO	POCI
MOSI	PICO
SS	CS

Рисунок 1.19 – Зміна застарілих назв на нові

SPI є синхронним протоколом, тобто використовує спільний тактовий сигнал (SCK) для синхронізації передачі даних між пристроями. Це дозволяє точно контролювати час передачі даних і підтримує вищі швидкості передачі даних порівняно з асинхронними протоколами, такими як UART.

SPI працює в конфігурації головний-підлеглий, де один пристрій (зазвичай мікроконтролер) діє як головний, а один або кілька пристроїв діють як підлеглий. Головний генерує тактовий сигнал і контролює передачу даних. Кожен підлеглий пристрій на шині SPI має виділену лінію Chip Select (CS), яка використовується для активації пристрою під час зв'язку. Головний пристрій встановлює низький рівень лінії CS для вибору цільового підлеглого пристрою та ініціює передачу даних.

Дані передаються 8- або 16-бітними фрагментами між головним і підлеглим пристроями. Головний надсилає дані підлеглому через лінію MOSI, одночасно отримуючи дані від підлеглого через лінію MISO. Дані синхронізуються за наростаючим або спадаючим фронтом сигналу SCK, залежно від конкретного режиму SPI, схему передачі SPI даних наведено на рис. 1.20.

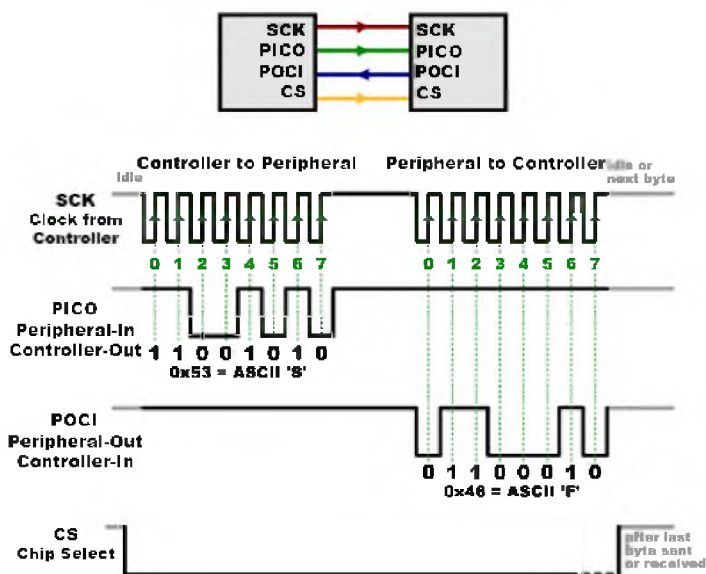


Рисунок 1.20 – Схема передачі даних протоколом SPI

SPI підтримує набагато вищі швидкості передачі даних, ніж I2C і UART, із типовою швидкістю від кількох Мбіт/с до десятків Мбіт/с. Це робить SPI придатним для високошвидкісних застосувань, таких як зчитування даних з гіроскопів, акселерометрів і SD-карт.

Під час використання SPI у дроні важливо переконатися, що всі пристрої сумісні з вибраним режимом SPI та належним чином підключені до головного пристрою. Через необхідність виділеної лінії CS для кожного підлеглого пристрою кількість доступних контактів на головному пристрої може обмежувати кількість підключених SPI-пристроїв [24].

1.9.4 CAN (Controller Area Network) — це надійний багатоголовний послідовний протокол зв'язку, розроблений для забезпечення обміну даними між кількома пристроями через двопровідну шину. Цей протокол забезпечує надійну передачу даних та виявлення помилок в умовах електричних шумів. Хоча CAN менш поширений у безпілотниках порівняно з такими протоколами, як UART, I2C і SPI, він використовується в деяких передових системах, як-от контролери польоту DJI N3 і A3, для зв'язку з периферійними пристроями, такими як GPS, блоки керування живленням і підвіси.

CAN використовує диференціальну сигналізацію на двох проводах: CAN-H (CAN High) і CAN-L (CAN Low). Такий підхід підвищує цілісність сигналу та стійкість до перешкод, що робить його придатним для суворих умов і більш довгих відстаней зв'язку порівняно з іншими протоколами, такими як I2C і SPI.

CAN використовує схему зв'язку на основі повідомлень, де пристрої передають пакети даних, звані "кадрами". Кадри містять ідентифікатор, довжину даних і байти даних. Кожен кадр транслюється всім пристроям у мережі, і лише призначений одержувач обробляє кадр відповідно до його ідентифікатора.

Стандартний кадр повідомлення CAN складається з кількох бітових полів, наведено на рис. 1.21.



Рисунок 1.21 - Стандартний кадр повідомлення CAN

Перший біт - це початок кадру (SOF). Цей домінуючий біт представляє початок повідомлення CAN. Далі йде 11-бітний ідентифікатор, який встановлює пріоритет повідомлення CAN. Чим менший ідентифікатор, тим вищий пріоритет повідомлення. Біт запиту на віддалену передачу (RTR) зазвичай є домінуючим, але він стає рецесивним, коли один вузол запитує дані в іншого. Біт розширення ідентифікатора (IDE) є домінуючим, коли надсилається стандартний кадр CAN, а не розширений. Біт r0 зарезервований і наразі не використовується. Ніббл коду довжини даних (DLC) означає, скільки байтів даних містить це повідомлення. Далі йдуть самі дані, тобто стільки байтів, скільки представлено в бітах DLC. Циклічна перевірка надмірності (CRC) — це 16-бітна контрольна сума для виявлення помилок у переданих даних. Якщо повідомлення прийнято належним чином, приймаючий вузол перезаписує рецесивний біт підтвердження (ACK) домінуючим бітом. ACK також містить біт-роздільник для підтримки синхронізації. Кінець кадру (EOF) означає кінець повідомлення CAN і має ширину 7 біт для виявлення помилок вставки бітів. Останньою частиною повідомлення CAN є міжкадровий простір (IFS), який використовується як час затримки. Ця затримка в точності дорівнює часу, необхідному CAN-контролеру для переміщення отриманого повідомлення в буфер для подальшої обробки.

Розширений CAN, сзему наведено на рис. 1.22. Extended CAN використовує 29-бітний ідентифікатор разом із кількома додатковими бітами. Розширене повідомлення має замінний біт віддаленого запиту (SRR) після 11-

бітового ідентифікатора, який діє як заповнювач, щоб зберегти ту саму структуру, що й стандартний CAN. Цього разу розширення ідентифікатора (IDE) має бути рецесивним, вказуючи, що за ним слідує розширений ідентифікатор. Біт RTR знаходиться після 18-бітного ідентифікатора, за ним слідує другий резервний біт, r1. Решта повідомлення залишається незмінним.



Рисунок 1.22 - Розширений кадр повідомлення CAN

CAN підтримує кілька головних і підлеглих пристроїв на одній шині, створюючи складні комунікаційні мережі. Кожен пристрій має унікальний ідентифікатор, що використовується для пріоритетизації повідомлень і прямого зв'язку між пристроями.

CAN підтримує різні швидкості передачі даних, від 125 Кбіт/с до 1 Мбіт/с. Дальність зв'язку може досягати кількох сотень метрів, залежно від таких факторів, як тип кабелю, швидкість передачі даних і топологія мережі.

При використанні CAN у безпілотах важливо переконатися, що всі пристрої в мережі мають унікальні ідентифікатори та сумісні з вибраною швидкістю передачі даних. Крім того, на кожному кінці шини повинні використовуватися відповідні кінцеві резистори, щоб мінімізувати відображення сигналу та підтримувати цілісність сигналу.

Ці протоколи зв'язку відіграють вирішальну роль у роботі дронів, забезпечуючи ефективний та надійний обмін даними між різними компонентами. При створенні та налаштуванні дрона важливо переконатися, що всі компоненти сумісні з необхідними протоколами зв'язку та правильно підключені до контролера польоту.

1.10 Зв'язок між роєм дронів

IEEE 802.11 є частиною набору технічних стандартів локальної мережі (LAN) IEEE 802 і визначає набір протоколів керування доступом до середовища (MAC) і протоколів фізичного рівня (PHY) для реалізації комп'ютерного зв'язку бездротової локальної мережі (WLAN). Стандарт і поправки є основою для бездротових мережевих продуктів, що використовують бренд Wi-Fi, і є найпоширенішими у світі стандартами бездротових комп'ютерних мереж. IEEE 802.11 використовується в більшості домашніх і офісних мереж, щоб дозволити ноутбукам, принтерам, смартфонам та іншим пристроям спілкуватися один з одним і отримувати доступ до Інтернету без підключення проводів. IEEE 802.11 також є основою для транспортних мереж зв'язку з IEEE 802.11p.

IEEE 802.11 використовує різні частоти, включаючи, але не обмежуючись, діапазони частот 2,4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц і 60 ГГц. Незважаючи на те, що специфікації IEEE 802.11 перераховують канали, які можна використовувати, доступність дозволеного радіочастотного спектру суттєво відрізняється залежно від регуляторної сфери. Протоколи зазвичай використовуються в поєднанні з IEEE 802.2 і призначені для бездоганної взаємодії з Ethernet і дуже часто використовуються для передачі трафіку Інтернет-протоколу.

Сімейство 802.11 складається з серії напівдуплексних методів модуляції по повітрю, які використовують той самий базовий протокол. Сімейство протоколів 802.11 використовує множинний доступ із визначенням несучої з уникненням зіткнень (CSMA/CA), за допомогою якого обладнання прослуховує канал для інших користувачів (включаючи користувачів, які не є користувачами 802.11) перед передачею кожного кадру (деякі використовують термін «пакет», який може бути неоднозначним). : «каркас» технічно правильніше). 802.11-1997 був першим стандартом бездротової мережі в сімействі, але 802.11b був першим широко прийнятим, а потім 802.11a, 802.11g, 802.11n, 802.11ac і 802.11ax. Інші стандарти в сімействі (c-f, h, j) є

службовими поправками, які використовуються для розширення поточної сфери застосування існуючого стандарту, ці поправки також можуть включати виправлення до попередньої специфікації. [9] Стандарти 802.11b і 802.11g використовують діапазон ISM 2,4 ГГц, що працює в Сполучених Штатах відповідно до частини 15 Правил і положень Федеральної комісії зв'язку США. 802.11n також може використовувати цей діапазон 2,4 ГГц. Через такий вибір діапазону частот обладнання 802.11b/g/n може час від часу відчувати перешкоди в діапазоні 2,4 ГГц від мікрохвильових печей, бездротових телефонів і пристроїв Bluetooth. 802.11b і 802.11g контролюють свої перешкоди та сприйнятливість до перешкод за допомогою методів сигналізації з розширеним спектром прямої послідовності (DSSS) і ортогонального частотного мультиплексування (OFDM) відповідно. 802.11a використовує діапазон 5 ГГц U-NII, який для більшої частини світу пропонує принаймні 23 неперекриваються канали шириною 20 МГц. Це є перевагою перед частотним діапазоном 2,4 ГГц ISM, який пропонує лише три канали шириною 20 МГц, які не перекриваються, де інші суміжні канали перекриваються.

802.11b, 802.11g і 802.11n-2.4 використовують спектр 2400–2500 ГГц, один із діапазонів ISM. 802.11a, 802.11n і 802.11ac використовують більш суворо регульований діапазон 4,915–5,825 ГГц. У більшості рекламної літератури вони зазвичай називаються «діапазонами 2,4 ГГц і 5 ГГц». Кожен спектр поділено на канали з центральною частотою та смугою пропускання, аналогічно тому, як поділяються смуги радіо- та телевізійного мовлення. Діапазон 2,4 ГГц розділений на 14 каналів, розташованих на відстані 5 МГц, починаючи з каналу 1, центр якого знаходиться на 2,412 ГГц. Останні канали мають додаткові обмеження або недоступні для використання в деяких регуляторних областях [23].

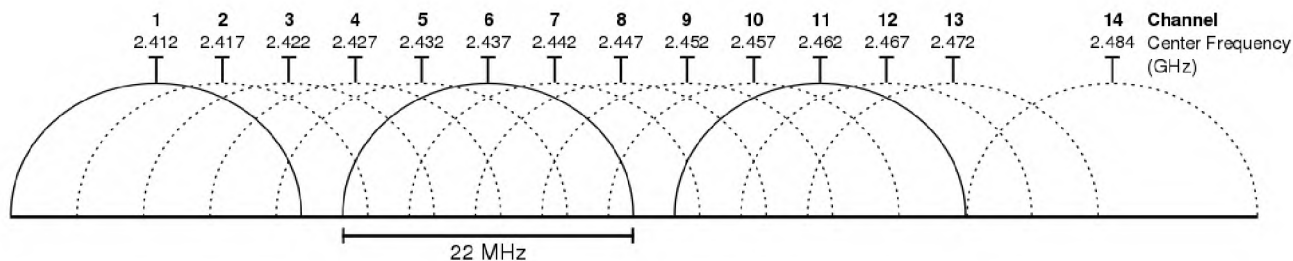


Рисунок 1.23 - Графічне представлення каналів Wi-Fi в діапазоні 2,4 ГГц

Wi-Fi Direct - це технологія, яка дозволяє пристроям безпосередньо з'єднуватися один з одним без необхідності використання точки доступу або маршрутизатора. Вона часто використовується для створення однорангових (peer-to-peer) мереж, де пристрої можуть обмінюватися даними напряму.

Переваги Wi-Fi Direct для роїв дронів.

Пристрої можуть легко знаходити один одного та встановлювати з'єднання без складної конфігурації.

Wi-Fi Direct підтримує швидкості передачі даних, подібні до стандартного Wi-Fi, що може досягати до 250 Мбіт/с і більше залежно від стандарту (802.11n, 802.11ac тощо). Це дозволяє швидко обмінюватися великою кількістю даних, що може бути корисно для передачі відео, телеметрії та інших важливих даних у реальному часі.

Wi-Fi Direct забезпечує захищене з'єднання за допомогою WPA2, що гарантує безпеку передачі даних між пристроями.

Недоліки Wi-Fi Direct для роїв дронів.

Дальність дії Wi-Fi Direct зазвичай обмежена радіусом до 200 метрів на відкритому просторі, що зменшується в приміщеннях через перешкоди.

Використання Wi-Fi Direct може швидко розряджати акумулятори дронів, що обмежує час їх автономної роботи.

Wi-Fi Direct є потужною технологією для створення однорангових з'єднань з високою швидкістю передачі даних та безпекою. Проте для використання в роях дронів необхідно враховувати обмеження щодо дальності дії та енергоспоживання.

LoRa (Long Range) - це технологія бездротового зв'язку, яка використовується для передачі даних на великі відстані з низькою швидкістю передачі даних. Вона відома своєю здатністю забезпечувати зв'язок на великих відстанях при низькому енергоспоживанні, що робить її ідеальною для застосувань в Інтернеті речей (IoT) та для роїв дронів.

Технологія LoRa має кілька варіацій та протоколів, які використовуються для різних застосувань, зокрема для роїв дронів. Нижче наведені основні варіації та протоколи, пов'язані з LoRa:

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)

LoRaWAN - це специфікація для мереж широкої зони, яка використовує технологію LoRa для бездротового зв'язку між пристроями і інтернетом через шлюзи. Це найпоширеніший протокол для IoT-застосувань.

Переваги:

Складається з кінцевих пристроїв, шлюзів, мережевих серверів та додатків.

Підтримує шифрування даних на різних рівнях.

Пристрої можуть працювати на батареях роками завдяки низькому енергоспоживанню.

Висока дальність дії.

Підтримка великої кількості пристроїв.

Надійна передача даних завдяки адаптивній швидкості передачі.

Недоліки:

Відносно низька швидкість передачі даних.

Затримка у передачі даних.

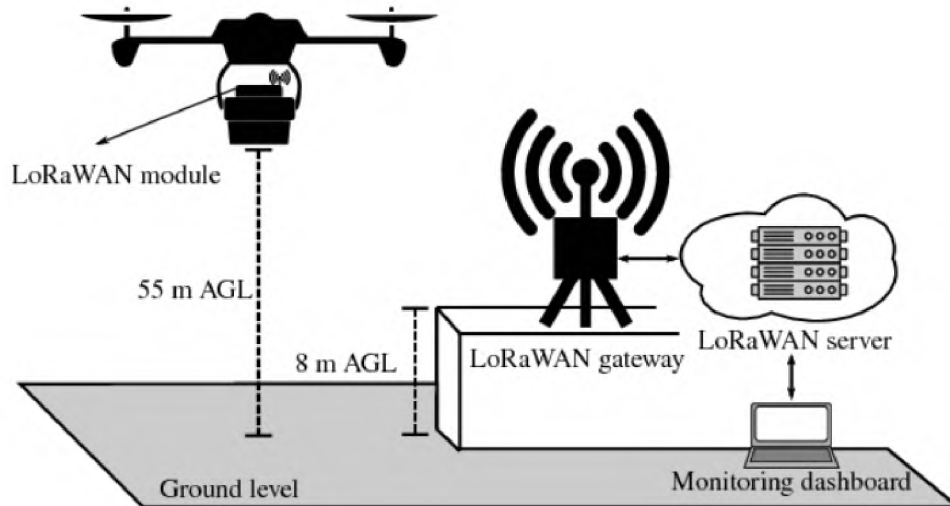


Рисунок 1.24 – принцип комунікації з використанням протоколів.

LoRa Mesh

LoRa Mesh дозволяє створювати мережу, де кожен вузол може передавати дані через інші вузли, збільшуючи радіус покриття та надійність мережі.

Переваги:

Збільшений радіус покриття. Дозволяє створювати розподілені мережі з великою кількістю вузлів. Мережа автоматично підлаштовується до змін у топології. Підвищена надійність завдяки дублюванню шляхів передачі.

Недоліки: Складність управління мережею. Вищі вимоги до обчислювальних ресурсів вузлів.

Порівняння LoRa, LoRa MESH і LoRaWAN наведено в табл. 1.2

Таблиця 1.2 – Порівняння протоколів LoRa.

Особливість	LoRa	LoRa MESH	LoRaWAN
Визначення	Протокол фізичного рівня, який використовує технологію Chirp Spread Spectrum для зв'язку на великі відстані.	Мережевий протокол, який дозволяє пристроям LoRa спілкуватися в сітчастій мережі.	Протокол рівня керування доступом до медіа (MAC), побудований поверх фізичного рівня LoRa, що визначає протокол зв'язку та архітектуру системи для мережі.
Діапазон	Велика дальність (2-5 км в міській місцевості, 15+ км в сільській місцевості).	Діапазон може бути розширений за межі базового діапазону LoRa за допомогою сітчастої мережі, оскільки повідомлення можуть стрибати між вузлами.	Подібно до LoRa, але ефективна дальність може залежати від архітектури мережі та розташування шлюзу.
Швидкість передачі даних	Змінюється від 0,3 кбіт/с до 27 кбіт/с.	Залежить від реалізації, але зазвичай схожий на LoRa, оскільки використовує той самий фізичний рівень.	Змінюється від 0,3 Кбіт/с до 50 Кбіт/с залежно від коефіцієнта поширення та пропускної здатності.
Споживання енергії	Низький, призначений для пристроїв, що живляться від батарейок.	Потенційно вище, ніж LoRa, через додаткові накладні витрати та активність ретрансляції повідомлень для інших вузлів.	Низький, оптимізований для тривалого часу автономної роботи завдяки адаптивній швидкості передачі даних і мережевому зв'язку.
Топологія мережі	Точка-точка або точка-багато точок.	Mesh-мережа, що забезпечує зв'язок між вузлами.	Топологія «зірка зірок», де кінцеві пристрої взаємодіють зі шлюзами, які підключаються до центрального мережевого сервера.
Випадок використання	Прості програми, що вимагають прямого зв'язку між пристроями.	Програми, які вимагають покриття в складних середовищах або з обмеженою мережевою інфраструктурою.	Підходить для широкомасштабних додатків IoT, які вимагають централізованого контролю, масштабованості та безпеки, таких як розумні міста та промисловий IoT.
Безпека	Базовий, залежить від реалізації.	Безпека керується в сітчастій мережі з потенційними вразливими місцями, коли повідомлення переходять між вузлами.	Розширений із наскрізним шифруванням із використанням унікальних мережевих і програмних ключів для кожного пристрою.
Масштабованість	Обмежується з'єднаннями «точка-точка».	Масштабується в межах розміру та складності сітчастої мережі.	Висока масштабованість, підтримка мільйонів пристроїв на великій території з кількома шлюзами.

1.11 Постановка задачі

Справжня ціль роботи дослідження протоколів зв'язку для виконання колективних завдань. Для реалізації поставленої цілі необхідно:

Розглянути логіку та структуру роботи апаратно-програмного комплексу для дистанційного керування рухом квадрокоптерів.

Визначити найбільш ефективного протоколу, який забезпечить стабільну комунікацію між дронами в умовах реальних операцій.

Розробка принцип роботи та динаміку руху літального апарату із застосуванням законів управління.

1.12 Висновки за розділом 1

1. Дрони, або безпілотні літальні апарати (БПЛА), є літальними апаратами без екіпажу, які можуть бути автоматизованими або дистанційно керованими. Вони використовуються для різних завдань, включаючи розвідку, зйомку, доставку, пошуково-рятувальні операції, і навчання. Завдяки своїй маневреності та здатності працювати у важкодоступних місцях, дрони стали невід'ємною частиною сучасної авіації та технологій.

2. Квадрокоптери мають чотири гвинти з постійним кутом атаки, кожен із яких приводиться в рух власним двигуном. Половина гвинтів обертається за годинниковою стрілкою, а половина — проти, взаємно компенсуючи обертання. Маневрування здійснюється шляхом зміни швидкості обертання гвинтів: збільшення обертів усіх гвинтів для вертикального підйому, зміна обертів з одного боку для руху вбік, і зміна обертів за годинниковою стрілкою та проти для поворотів. Конфігурація гвинтів може бути «+» або «X», що впливає на схему керування.

3. Мультикоптер складається з мікропроцесора, який керує всією системою, отримуючи сигнали від гіроскопів та радіопередавача. Гіроскопи забезпечують стабільність, контролюючи крен, тангаж та обертання. Процесор через регулятори швидкості керує обертанням електродвигунів для підтримки рівноваги. Додаткові сенсори, такі як акселерометри, барометри та GPS, покращують контроль висоти і навігацію. Гідролокатор використовується для обльоту перешкод, автоматичної посадки та підтримки низької висоти.

4. Найкращий вибір для рою дронів у пошуково-рятувальних операціях залежить від кількох факторів, включаючи надійність радіозв'язку, дальність дії, низьку затримку, та стабільність керування. Використання протоколів, таких як TBS Crossfire для великої дальності та FrSky ACCESS для низької затримки та високої роздільної здатності, забезпечує ефективне керування та взаємодію дронів.

5. Протоколи «приймач-контролер» забезпечують дротовий зв'язок між приймачем (RX) та контролером польоту (FC) і відіграють важливу роль у швидкості реакції дронів на команди пілота. Вибір протоколу залежить від вимог до швидкості передачі даних, кількості каналів, сумісності обладнання та умов експлуатації.

6. Протоколи ESC, такі як PWM, OneShot125, OneShot42, MultiShot та DShot, використовуються для забезпечення зв'язку між контролером польоту та ESC у квадрокоптері. Вони дозволяють контролеру надсилати команди на ESC для керування швидкістю та напрямком двигунів.

7. UART, I2C, SPI та CAN - це популярні протоколи для внутрішнього зв'язку у дронах. Кожен з них має свої переваги та використовується в різних ситуаціях залежно від потреб системи.

8. IEEE 802.11, частина технічних стандартів LAN, визначає протоколи для бездротових WLAN. Wi-Fi Direct та LoRa - технології, що допомагають у створенні мережі бездротового зв'язку. Wi-Fi Direct забезпечує простий зв'язок

між пристроями, а LoRa забезпечує велику дальність зв'язку із зниженим споживанням енергії, що корисно для роїв дронів.

Підсумуємо основне.

Дрони є невід'ємною частиною сучасної авіації та технологій, забезпечуючи широкий спектр застосувань від розвідки до пошуково-рятувальних операцій.

Квадрокоптери, зі своєю конфігурацією гвинтів та маневреністю, є одним із найпопулярніших типів дронів, здатних до ефективного керування в різних умовах.

Мультикоптери використовують ряд сенсорів та процесорів для стабілізації та навігації, що дозволяє їм працювати навіть у важкодоступних місцях.

Вибір протоколів для бездротового зв'язку і керування (як у "приймач-контролер", так і ESC) впливає на швидкість реакції та стабільність дронів у польоті.

Використання технологій Wi-Fi Direct та LoRa сприяє створенню ефективних мереж бездротового зв'язку для роїв дронів з великою дальністю та низьким споживанням енергії.

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБКИ КВАДРОКОПТЕРІВ ТА КЕРУВАННЯ НИМИ.

2.1 Апаратне забезпечення

Рама дрона є фундаментальною структурою, яка підтримує всі інші компоненти. Вона повинна бути міцною, але легкою, щоб забезпечити баланс між стійкістю та маневреністю. Найпоширенішими матеріалами для рам є вуглецеве волокно, алюміній та пластик. Вуглецеве волокно має високу міцність та низьку вагу, що робить його ідеальним для більшості дронів. Дизайн рам може варіюватися від простих Н-рам до складніших Х-рам або інноваційних варіантів, що оптимізують аеродинаміку і зменшують вібрацію.

Мотори є ключовими для підйому та руху дрона. Безщіткові електродвигуни (BLDC) широко використовуються через їхню високу ефективність і тривалий термін служби. Основні параметри моторів включають потужність (kV рейтинг), тягу, ефективність та надійність. Використання магнітів з високою коерцитивною силою та високотемпературних підшипників підвищує продуктивність моторів.

Електронні регулятори швидкості (ESC) контролюють швидкість обертання моторів на основі сигналів від польотного контролера. Сучасні ESC використовують прошивки з підтримкою протоколів, таких як BLHeli_S або BLHeli_32, які забезпечують точне керування і зменшують затримки. Ефективне охолодження ESC критично важливе для запобігання перегріву і підвищення довговічності.

Пропелери генерують підйомну силу, необхідну для польоту. Найчастіше використовуються нейлон, армований скловолокном, або вуглецеве волокно. Форма і розмір пропелерів впливають на ефективність і стабільність польоту.

Існують пропелери спеціального призначення для різних умов польоту (наприклад, швидкість, тяга, стійкість до вітру).

Літій-полімерні (LiPo) батареї є стандартом у індустрії дронів завдяки їх високій енергетичній щільності та здатності до швидкої віддачі струму. Важливими параметрами є напруга (кількість елементів, або S-рейтинги), ємність (mAh) і здатність до швидкої віддачі струму (C-рейтинги). Ефективне управління зарядом і розрядом, а також правильне зберігання продовжують термін служби батарей.

Польотний контролер є центральним процесором, який обробляє дані від сенсорів і приймає рішення щодо керування. Включають гіроскопи, акселерометри, магнітометри та барометри. Операційні системи, такі як ArduPilot і PX4, підтримують різні режими польоту і місійні функції.

Програмне забезпечення.

Операційні системи для дронів забезпечують основу для роботи всіх компонентів і виконання місій.

- ArduPilot: Забезпечує широкий спектр функцій, включаючи автопілот, стабілізацію, планування місій, та підтримку різних типів дронів.
- PX4: Відкрита платформа, що підтримує інтеграцію з ROS (Robot Operating System) та використовується для наукових досліджень та комерційних застосувань.

Алгоритми керування забезпечують стабільність польоту і виконання місій.

- PID-регулятори: Використовуються для базової стабілізації дрона.
- Алгоритми SLAM (Simultaneous Localization and Mapping): Використовуються для автономної навігації в невідомих середовищах.

Симулятори дозволяють тестувати і налаштовувати алгоритми без ризику пошкодження дрона.

- Gazebo: симулятор з відкритим кодом, що дозволяє моделювати складні середовища і фізичні взаємодії.
- Mission Planner: програмне забезпечення з вбудованим симулятором є потужним інструментом для планування, тестування та оптимізації місій безпілотних літальних апаратів. Використання симулятора дозволяє значно знизити ризики і витрати, пов'язані з тестуванням у реальному середовищі, та забезпечити безпеку і ефективність виконання місій.
- AirSim: симулятор, створений Microsoft, який підтримує високу реалістичність і інтеграцію з AI алгоритмами.

Наукові дослідження та розробки.

- Аеродинамічні дослідження. Дослідження аеродинаміки дронів фокусуються на оптимізації форми пропелерів і рам для зменшення аеродинамічного опору і підвищення ефективності.
- Математичні моделі. Розробка математичних моделей для моделювання динаміки польоту, управління та навігації дронів.
- Автономні системи. Дослідження в галузі автономних систем зосереджені на розробці алгоритмів для автономної навігації, виявлення та уникнення перешкод, а також виконання складних місій без втручання людини.
- Інтерфейси для інтеграції AI. Інтеграція штучного інтелекту для розпізнавання об'єктів, прийняття рішень в реальному часі та адаптивного керування.

Виклики.

- Енергоєфективність. Пошук способів підвищення енергоєфективності для продовження часу польоту.
- Надійність зв'язку. Забезпечення стабільного і безпечного зв'язку між дроном та оператором, особливо в умовах, де можливі перешкоди.
- Безпека. Розробка методів запобігання зіткненням і забезпечення безпечного виконання польотів в урбанізованих або складних середовищах.

Наукові дослідження і технологічні інновації у сфері розробки та керування квадрокоптерами сприяють їхньому широкому використанню у різних сферах, від пошуково-рятувальних операцій до агрономії. Ефективне поєднання апаратного забезпечення та програмного забезпечення, а також використання передових алгоритмів керування, дозволяють створювати високотехнологічні, надійні та ефективні дрони.

2.2 Програмне забезпечення/Безпілотне керування

Програмне забезпечення для керування польотами є важливою складовою будь-якого безпілотника, оскільки воно обробляє дані датчиків, виконує алгоритми керування польотом та надає користувацький інтерфейс для конфігурації та налаштування. Існує декілька популярних варіантів такого програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, кожен з яких має свої унікальні функції та можливості. Варто розглянути найбільш поширені варіанти програмного забезпечення для керування польотами [25].

2.2.1. ArduPilot — це комплексне програмне забезпечення для автопілоту з відкритим вихідним кодом, розроблене для різних систем безпілотного транспортного засобу, включаючи мультикоптери, літаки з нерухомим крилом та наземні безпілотники. ArduPilot надає широкий спектр функцій, таких як

навігація за маршрутними точками GPS, планування задач і параметри безвідмовності. Він підтримує різні апаратні платформи, такі як Pixhawk і Cube, та пропонує потужне програмне забезпечення наземної станції управління, наприклад, Mission Planner і QGroundControl.

Основні характеристики та особливості Ardupilot включають:

- **Режими та функції польоту:** Ardupilot підтримує різні режими польоту, від повністю ручного до повністю автономного, що відповідає різним рівням кваліфікації пілотів та сценаріям використання. Він також підтримує розширену навігацію за маршрутними точками та планування місій.
- **Сумісність:** Ardupilot сумісний з різними апаратними засобами керування польотом, переважно зосереджений на платах на базі Pixhawk, а також підтримує інше обладнання, наприклад серії Matek і CUAV. Він працює з численними протоколами зв'язку, датчиками та периферійними пристроями.
- **Програмне забезпечення наземної станції керування:** Ardupilot зазвичай використовується з програмним забезпеченням наземної станції керування, таким як Mission Planner або QGroundControl, для зручного налаштування, моніторингу та керування БПЛА.
- **Підтримка кількох платформ:** Ardupilot розроблений для підтримки різних платформ БПЛА, таких як мультиротори (ArduCopter), літаки з нерухомим крилом (ArduPlane), гелікоптери (ArduHeli) і наземні колісні БПЛА (ArduRover).

Отже, Ardupilot є відмінним вибором для широкого спектру застосувань у безпілотних літальних апаратах завдяки своїм розширеним функціям, сумісності та підтримці різних платформ.

2.2.2. PX4 - це високофункціональне програмне забезпечення для автопілотів з відкритим вихідним кодом, яке призначене для різних типів безпілотних літальних апаратів (БПЛА), включаючи мультиротори, літаки, гелікоптери та наземні автомобілі. Це потужна платформа з великою кількістю функцій та можливостей як для галузі любителів, так і для комерційних застосувань. Основні переваги PX4 полягають у його гнучкості, надійності та здатності працювати з різним обладнанням та в середовищах змінних умов.

Деякі ключові особливості та характеристики PX4 включають:

- **Режими та функції польоту:** PX4 підтримує широкий спектр режимів польоту, включаючи стабілізацію, утримання висоти, позиціонування по GPS, автоматичний політ, планування маршруту та RTL (повернення до старту). Це дозволяє адаптувати БПЛА до різних сценаріїв використання та вимог польоту.
- **Сумісність з обладнанням:** PX4 сумісний з широким спектром апаратних засобів керування польотом, включаючи різні платформи, датчики, GPS-модулі та інші пристрої. Це робить його універсальним вибором для різних типів БПЛА та сценаріїв використання.
- **Архітектура системи:** PX4 використовує модульну архітектуру, що дозволяє легко розширювати функціональність та додавати нові модулі або алгоритми безпосередньо до програмного забезпечення. Це сприяє розвитку та вдосконаленню системи з часом.
- **Відкритий вихідний код:** PX4 базується на відкритому вихідному коді, що сприяє активному співтворенню та підтримці спільнотою розробників. Це також дозволяє користувачам налаштовувати та адаптувати програмне забезпечення під свої потреби та вимоги.
- **Система керування місіями:** PX4 має розширену систему керування місіями, яка дозволяє планувати та виконувати складні автономні місії,

включаючи навігацію по точках маршруту, автоматичне виконання завдань та інші функції, необхідні для різних застосувань.

- Спільнота розробників та підтримка: PX4 має активну та допоміжну спільноту розробників і користувачів, яка забезпечує підтримку, виправлення помилок та розвиток програмного забезпечення через різні ресурси, такі як форуми, GitHub та інші.

Отже, PX4 є потужним і універсальним програмним забезпеченням для автопілотів, яке може задовольнити потреби як ентузіастів, так і професіоналів у безпілотних літальних апаратах, забезпечуючи високий рівень функціональності, надійності та гнучкості.

2.2.3. Betaflight - це програмне забезпечення для керування багатороторними безпілотними літальними апаратами (БПЛА), такими як квадрокоптери, гексакоптери та інші мультиротори. Воно відкритого вихідного коду і призначене для пілотів-любителів, гонщиків FPV (відео в першій особі) та професіоналів, які шукають високофункціональну та налаштовану платформу для керування своїми БПЛА. Основні особливості та характеристики Betaflight включають:

- Режим польоту: Betaflight підтримує різні режими польоту, такі як Acro (акробатичний), Angle (кутовий), Horizon (горизонт) та режими GPS для автономних польотів. Це дозволяє пілотам вибирати режими відповідно до їхніх навичок та потреб.
- PID-регулятор: Betaflight має розширену систему PID-регуляції, яка дозволяє налаштовувати параметри керування для оптимальної стабільності та ефективності польоту.
- Налаштування через інтерфейс: Програмне забезпечення Betaflight має зручний інтерфейс для налаштування параметрів польоту, PID-налаштувань, карт гіроскопа та акселерометра, а також інших

налаштувань, які дозволяють оптимізувати роботу БПЛА під конкретні завдання.

- FPV-контроль: Betaflight підтримує відео та телеметричний контроль через системи FPV, що дозволяє пілотам отримувати відеострім, телеметрію та інші дані під час польоту в реальному часі.
- Автоматичні режими: Окрім ручного керування, Betaflight підтримує автоматичні режими, такі як виправлення стабільності (self-level), автоматичний повернення до дому (return to home) та інші, що робить його придатним для різних сценаріїв використання.
- Активна спільнота: Betaflight має велику активну спільноту користувачів та розробників, яка постійно розвиває та вдосконалює програмне забезпечення, додаючи нові функції та виправляючи помилки.

Загалом, Betaflight є популярним інструментом для керування багатороторними БПЛА, який надає широкі можливості налаштування та контролю для пілотів різних рівнів навичок та досвіду.

2.2.4. Cleanflight - це відкрите програмне забезпечення для керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА), зокрема для квадрокоптерів, гексакоптерів, мультироторів та літаків. Це програмне забезпечення має на меті надати користувачам простий у використанні інтерфейс для налаштування параметрів польоту та навігації своїми БПЛА. Основні особливості та характеристики Cleanflight включають:

- PID-регулятор: Cleanflight має розширену систему PID-регуляції, яка дозволяє налаштовувати параметри керування для досягнення стабільного та ефективного польоту. Це включає налаштування реакції на зміни положення та кутів апарату.
- Режими польоту: Програмне забезпечення Cleanflight підтримує різні режими польоту, такі як Acro (акробатичний), Angle (кутовий), Horizon

(горизонт) та автоматичні режими. Це дозволяє користувачам вибрати оптимальний режим відповідно до умов польоту та своїх навичок.

- **Настроювання через інтерфейс:** Cleanflight має зручний інтерфейс для налаштування параметрів польоту та навігації. Це включає в себе регулювання реакції на вхідні сигнали, калібрування датчиків, налаштування функцій автопілота та багато іншого.
- **FPV-контроль:** Cleanflight підтримує відео та телеметричний контроль через системи FPV (відео в першій особі). Це дозволяє пілотам отримувати відео трансляцію з камери на БПЛА та інші дані під час польоту.
- **Автоматичні місії:** Cleanflight має певні можливості автоматизації, включаючи можливість планування та виконання автоматичних місій, таких як повернення до дому (Return to Home), автопілот та інші функції.
- **Активна спільнота розробників:** Cleanflight має широку спільноту користувачів та розробників, яка постійно розвиває та вдосконалює програмне забезпечення, додаючи нові функції та виправляючи помилки.

Загалом, Cleanflight перетворився в Betaflight.

2.2.5. INAV (Interactive Navigation) - це відкрите програмне забезпечення для автопілотів, призначене для безпілотних літальних апаратів (БПЛА), зокрема для квадрокоптерів, літаків, гексакоптерів та інших типів апаратів. Це програмне забезпечення забезпечує широкий спектр функцій для навігації, керування та автоматизації польотів БПЛА. INAV ґрунтується на кодовій базі Cleanflight, але спрямоване на надання розширених навігаційних можливостей для пілотів, що цікавляться польотами на великій відстані, аерофотозйомкою та автономними місіями.

Ключові функції та характеристики INAV включають:

- Підтримка GPS і навігації. INAV зосереджується на наданні складних можливостей польоту за допомогою GPS, таких як утримання GPS (положення та висота), повернення додому (RTH) і навігація за маршрутними точками.
- Сумісність з різними платформами. INAV підтримує широкий спектр апаратного забезпечення польотного контролера, такий як Omnibus F4, Matek F405-Wing і серії INAV F3/F4, а також різні типи датчиків, такі як GPS, барометри та магнітометри.
- Підтримка кількох платформ. INAV призначено для різних типів літаків із нерухомим крилом та навіть колісних безпілотників, що робить його універсальним вибором для різних застосувань.
- Підтримка спільноти та інструментів конфігурації, аналогічно до Cleanflight та Betaflight.

Отже, INAV є ідеальним вибором для користувачів, які цікавляться розширеними функціями польоту та автономною навігацією за допомогою GPS для багатороторних літаків і літаків із нерухомим крилом.

2.3. Комунікація програмного забезпечення для керування польотами квадрокоптерів.

ArduPilot:

ArduPilot використовує різні методи комунікації, такі як телеметрія через радіо, провідний зв'язок через USB або UART, дистанційне управління (RC) та мережевий зв'язок через Wi-Fi або 4G. Він також підтримує використання програмних інтерфейсів (API) для зв'язку з іншими програмами або пристроями.

PX4:

PX4 також використовує телеметрію через радіо, провідний зв'язок через USB або UART, дистанційне управління (RC) та мережевий зв'язок через Wi-Fi, 4G тощо. Він інтегрується з програмами керування, такими як QGroundControl, для зручного керування та налаштування.

Betaflight:

Betaflight спеціалізується на гонках та маневреному керуванні, і використовує телеметрію через радіо, дистанційне управління (RC) та мережевий зв'язок через Bluetooth або Wi-Fi для керування та налаштування.

INAV:

INAV також підтримує різні методи комунікації, включаючи телеметрію через радіо, провідний зв'язок через USB або UART, дистанційне управління (RC) та мережевий зв'язок через Wi-Fi або 4G.

Кожен з цих варіантів має свої унікальні можливості комунікації, які можуть бути використані в залежності від конкретних потреб і умов використання квадрокоптера.

Для автономного польоту квадрокоптера та функцій автопілота існують два популярні програмні забезпечення контролера польоту: Ardupilot та INAV. Автономне керування є лише однією з можливостей цих програм, оскільки вони представляють собою повноцінні програми для управління польотом. Ось деякі ключові функції автопілота Ardupilot та INAV:

- Вони пропонують різні режими польоту для різних рівнів кваліфікації пілотів та сценаріїв використання, такі як стабілізація, утримання висоти, вільний рух, керований, автоматичний, круговий, RTL (повернення до старту) та посадка. Ці режими дозволяють пілотам легко перемикатися між ручним керуванням та різними рівнями автономії під час польоту.

- Вони підтримують розширене планування місій та навігацію за точками, що дозволяє користувачам створювати та виконувати складні маршрути з кількома точками, діями та умовами. Ця функція особливо корисна для застосувань, таких як аерофотозйомка, картографування та пошуково-рятувальні операції.
- Вони мають можливість створення геозон для обмеження робочої зони БПЛА та уникнення його польоту у заборонених зонах. Крім того, вони пропонують різні варіанти захисту від втрати зв'язку з наземною станцією керування, низького рівня заряду батареї та інших критичних ситуацій, таких як RTL або аварійна посадка.
- Вони підтримують розширені навігаційні функції, такі як спостереження за рельєфом місцевості, що дозволяє БПЛА підтримувати постійну висоту над землею, а також функції, такі як "Follow Me", що дозволяє автономно стежити за наземним пристроєм із підтримкою GPS.
- Обидва рішення мають відкритий вихідний код, що дозволяє користувачам змінювати та розширювати їх функціональність згідно з конкретними вимогами. Це забезпечує гнучкість у використанні додаткових датчиків, розробці індивідуальних режимів польоту та впровадженні інших спеціальних функцій.
- Вони також забезпечують хорошу інтеграцію з різними системами камер і гімбалами, що забезпечує точне керування камерою та стабілізацію під час польоту. Це особливо корисно для застосувань, таких як аерофотозйомка, відеозйомка та картографування.
- Обидва рішення підтримують телеметрію та реєстрацію даних у реальному часі, що дозволяє користувачам контролювати стан, роботу та дані з датчиків БПЛА під час польоту, що має велике значення для

аналізу польотних характеристик, діагностики проблем та оптимізації конфігурації.

- Ardupilot розроблено для роботи з різноманітними типами БПЛА, такими як мультиротори, літаки з нерухомим крилом, гелікоптери та наземні колісні дрони, що робить його універсальним для багатьох застосувань та сценаріїв.

2.4 Збірка апаратної частини БПЛА

Підхід до складання квадрокоптера включає декілька важливих кроків і вимагає уваги до деталей, від вибору компонентів до програмного забезпечення [12]. Наведемо основні частини необхідні для збірки дрона для пошуково-рятувальної операції, схему наведено на рис. 2.11.

Каркас

Контролер польоту

Мотори та пропелери

ESC

Камери та сенсори

GPS модуль

Акумулятор

Передавач та приймач

Зарядний пристрій

Розглянемо більш конкретні компоненти для нашої задачі.

У якості каркасу виберемо карбонову раму для квадрокоптера Tarot Iron Man FY650 складна, наведено на рис. 2.1.

Каркас Tarot Iron Man FY650 має складну, але легку конструкцію, що спрощує процес збірки та розбирання дрона для обслуговування та транспортування. Зроблений з високоякісного карбонового волокна. Цей матеріал відомий своєю міцністю та легкістю, що дозволяє підвищити міцність дрона без додаткового навантаження.



Рисунок 2.1 – Каркас Tarot Iron Man FY650

У якості польотного контролера буде використано Pixhawk 4, наведено на рис. 2.2. Це один з найпопулярніших і високопродуктивних польотних контролерів на ринку з безліччю переваг, які роблять його привабливим для використання у різних типах дронів, який забезпечує надійний та стабільний контроль над дроном.

Цей контролер має вбудований набір сенсорів, таких як гіроскопи, акселерометри, магнітометри та барометр, що дозволяє забезпечити точне визначення положення, орієнтації та висоти дрона. Контролер має різні роз'єми для підключення додаткових модулів, таких як камери, LiDAR, тепловізори та інші сенсори. Pixhawk 4 базується на відкритому програмному забезпеченні PX4 або ArduPilot, що дає можливість налаштувати і розширювати функціональність контролера згідно з нашими потребами.



Рисунок 2.2 – польотний контролер Pixhawk 4

Перш ніж збирати все до купи потрібно перевірити, чи він працює, підключивши його до комп'ютера за допомогою USB-кабелю. Якщо загорілись всі відповідні світлодіоди, і він успішно підключився, з ним все добре.

Треба завантажити останню версію ArduPilot для нашого дрона з офіційного сайту ArduPilot. Переконайтесь, що ви встановили правильну версію програмного забезпечення для вашого контролера Pixhawk 4.

Використовуватимемо програмне забезпечення для налаштування ArduPilot, таке як Mission Planner або QGroundControl.

Matek PDB HEX 12S – плата розподілу живлення, призначена для багатороторних дронів, забезпечуючи надійне і стабільне живлення для всіх компонентів дрона, наведено на рис. 2.3. Завдяки своїм високим характеристикам і надійності, ця плата розподілу живлення дозволить вам отримати максимальну продуктивність і стабільність під час пошуково-рятувальних операцій.



Рисунок 2.3 - Плата розподілу живлення Matek.

Оберемо мотори U3 Power Type UAV Motor KV700 (4 штуки), наведено на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – мотор U3 Power Type UAV Motor KV700

Мотор U3 Power Type UAV Motor KV700 - потужний і ефективний мотор, який забезпечує високу тягу і стабільність польоту, призначені для дронів та професійних додатків, включаючи пошуково-рятувальні операції, аерофотозйомку та інші завдання, що потребують високої тяги і стабільності.

Основні характеристики:

KV Рейтинг (оберти на вольт): 700 KV.

Максимальна потужність: близько 500 Вт.

Навантаження: до 1.8 кг тяги на мотор.

Завдяки високоякісним матеріалам і точній обробці, мотор забезпечує високу ефективність, що сприяє більшому часу польоту і меншим витратам енергії. До них підбираємо підходящі пропелери, наведено на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 - пропелери P13*4.4 Prop



Рисунок 2.6 - AIR 40A 2-6S Мультироторний БПЛА Drone ESC

ESC (Electronic Speed Controller) T-Motor AIR 40A 2-6S призначений для управління безщітковими моторами дронів, забезпечуючи стабільність і ефективність польоту, наведено на рис. 2.6.

Підтримка протоколів: DShot150, DShot300, DShot600, Oneshot125, Oneshot42, Multishot.

Висока швидкість оновлення (High Refresh Rate): Забезпечує швидкий відгук на зміни команд польотного контролера, що підвищує стабільність польоту. Захист від перевантаження по струму, перегріву і низької напруги: Запобігає пошкодженням ESC і моторів у випадку екстремальних умов.

Оптимізований для мультикоптерів: Призначений спеціально для використання у дронах, забезпечуючи максимальну ефективність і надійність.



Рисунок 2.7 - Herelink HD Video Transmission System

На зображенні 2.7 показано систему дистанційного керування дронами. Ця система складається з контролера (пульта керування) з вбудованим екраном та антеною, а також з приймача (або передавача) з двома антенами. Ця система, Herelink HD Video Transmission System, яка забезпечує передачу відео високої чіткості та телеметричних даних на великі відстані. Вона підтримує двосторонній зв'язок між пультом керування і дроном, що дозволяє отримувати відео в реальному часі, а також передавати команди для управління дроном.

Основні характеристики:

Дальність передачі: До 20 км у відкритих просторах.

Роздільна здатність відео: До 1080p.

Затримка передачі відео: Низька, зазвичай менше 200 мс.

Сумісність: Сумісність з багатьма автопілотами.

Додаткові функції: Можливість передавати телеметричні дані та команди управління в режимі реального часу.



Рисунок 2.8 – GPS M9N.

В якості GPS будемо використовувати M9N, наведено на рис. 2.8. GPS використовує GNSS із кількома сузір'ями на базі u-blox M9N, паралельного приймача GNSS, який може приймати та відстежувати декілька систем GNSS. Завдяки багатодіапазонній радіочастотній інтерфейсній архітектурі всі чотири основні угруповання GNSS, GPS, Galileo, GLONASS і BeiDou можуть прийматися одночасно. Він також оснащений компасом IST8310, триколірним світлодіодним індикатором, зумером і захисним вимикачем. Є 3 різні варіанти роз'ємів для різних цілей. Цей модуль поставляється зі швидкістю передачі даних 115200.



Рисунок 2.9 – камера DJI Zenmuse H20

На зображенні 2.9 наведено DJI Zenmuse H20 – багатофункціональна камера, розроблена для дронів. Камера забезпечує високу точність і ефективність у пошуково-рятувальних операціях завдяки комбінації кількох сенсорів. Основні характеристики включають: 20 МП CMOS сенсор для зйомки

високоякісних зображень та відео, гібридний оптичний зум (23x) для деталізації об'єктів, лазерний далекомір з дальністю до 1200 м для точного вимірювання відстаней, та тепловізійну камеру для зйомки теплових зображень, що допомагає знаходити людей або тварин у різних умовах. Камера підтримує відео з роздільною здатністю до 4K/30fps. 3-осьова стабілізація забезпечує чіткі та стабільні зображення навіть в умовах високої турбулентності. Інтелектуальні функції включають AI Spot-Check для автоматичного виявлення та відстеження об'єктів, High-Res Grid Photo для зйомки високоякісних панорамних зображень, та Night Mode для поліпшеної зйомки в умовах низького освітлення. Переваги камери: універсальність, висока роздільна здатність, та інтелектуальні функції, що допомагають автоматизувати процес зйомки та аналізу даних, знижуючи навантаження на оператора. Камера DJI Zenmuse H20 є чудовим доповненням для вашого дрона Tarot Iron Man FY650, особливо для пошуково-рятувальних операцій, покращуючи ефективність і точність виконання завдань.



Рисунок 2.10 – Акумулятор 6S3P.

Акумулятор 6S3P, 12000 mAh, 22.2 V, 120 A, н наведено на рис. 2.10, є відмінним вибором для нашого дрону через кілька ключових переваг. Вони забезпечують тривалий час польоту завдяки великій ємності, підвищують ефективність мотора завдяки високій напрузі, гарантують потужне живлення для всіх компонентів завдяки високому струму розряду, та мають високу надійність завдяки конфігурації 6S3P.

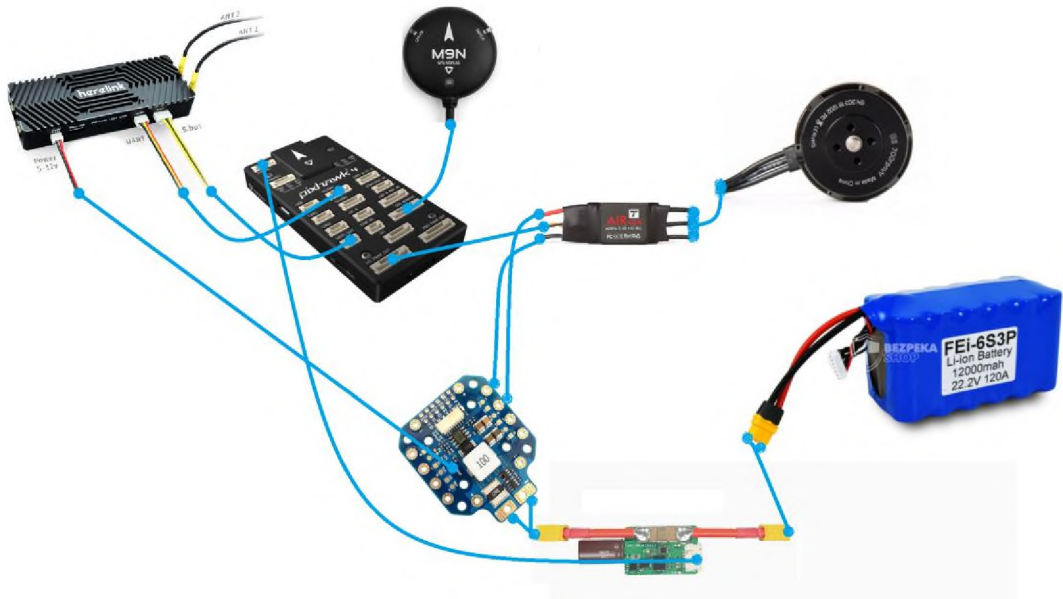


Рисунок 2.11 – Схема підключення компонентів

Знаючи цю всю інформацію, про взаємодію всіх компонентів по тим чи іншим протоколам, оберемо для нашого борта підходящі комунікації.

Мотори (U3 Power Type UAV Motor KV700) та ESCs (AIR 40A 2-6S).

Протокол ESCs: DShot (переважно DShot600 або DShot150). Це цифровий протокол, який забезпечує більш точну та швидку передачу сигналів до ESCs порівняно з традиційними аналоговими протоколами (PWM).

GPS модуль (GPS M9N): GPS модулі зазвичай використовують послідовний зв'язок через UART для передачі даних про місцезнаходження до контролера польоту.

Система передачі відео (Herelink HD Video Transmission System): SBUS для передачі відеосигналу від камери та UART для управління та телеметрії. Herelink забезпечує високоякісну передачу відео і є сумісною з контролером польоту через UART.

Камера Zenmuse H20 підключається до контролера через спеціальний інтерфейс DJI і використовує власний протокол передачі даних.

Налаштовувати керування та задавати місію ми будемо через Mission Planner [16]. Налаштовуватимемо параметри польоту, такі як висота, швидкість і маршрут, відповідно до наших завдань. Mission Planner Swarm з використанням протоколу Mavlink (Місіон Планнер Сварм з Мавлінк) представляє собою комплексну систему для координації та управління дронами в режимі зграї, вікно налаштувань наведено на рис. 2.12. Вона використовує протокол Mavlink для передачі даних між дронами та наземною станцією, забезпечуючи взаємодію між кількома апаратами одночасно. Ця інтеграція дозволяє синхронізувати маршрути, планувати та виконувати спільні місії з використанням кількох дронів, що значно підвищує ефективність виконання завдань, таких як пошуково-рятувальні операції, схема наведена на рис. 2.13.

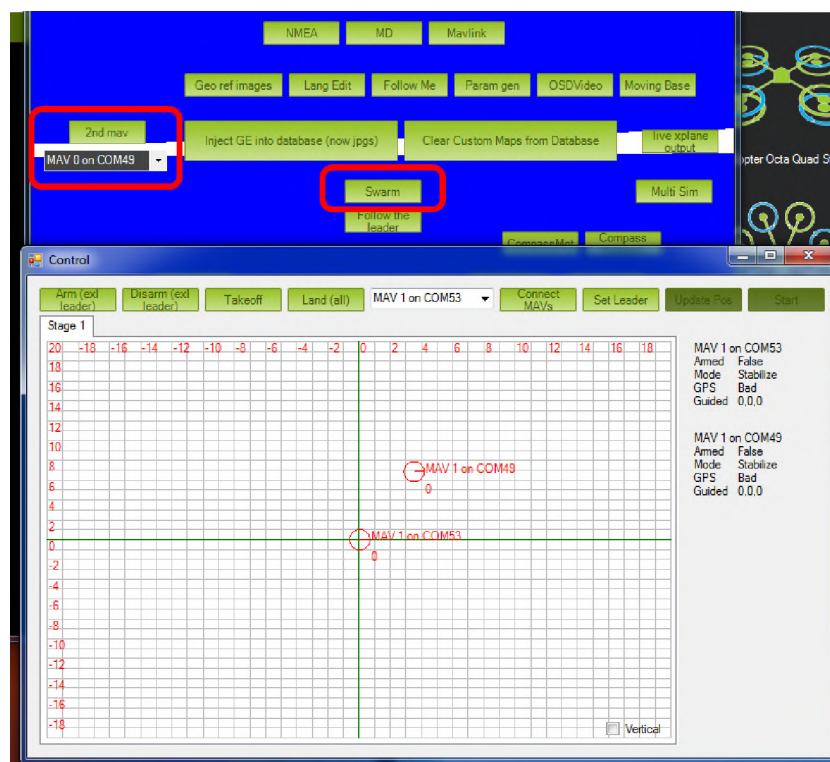


Рисунок 2.12 – Комунікація рою через Mission Planner

Mission Planner підтримує обмежений «рой», або політ у строю з кількома БПЛА, досягає цього обмеження способом, просто відкриваючи кілька з'єднань послідовного порту MAVLink одночасно і передаючи інформацію про позицію GPS від одного («лідера», літаючого в будь-якому режимі, від ручного

до автоматичного) до інший («послідовники» , що літають у керованому режимі).

Процедура налаштування:

1. Підключити одне 3DR-радіо на кожен апарат.
2. Підключитися до «лідера» в планувальнику місій.
3. Натиснути Control-F і натисніть «swarm».
4. Натиснути «Установити лідера».
5. Натиснути «Підключити MAVs. Натисніть один раз для кожного MAV. Коли кожен підключатиметься через MAVLink, вони з'являтимуться в сітці
6. Перетягнути кола MAV навколо сітки, щоб встановити потрібні зміщення. Планувальник місій припускає, що «вгорі» — це північ.
7. «Старт» почне надсилати маршрутні точки в керованому режимі всім транспортним засобам, крім лідера.

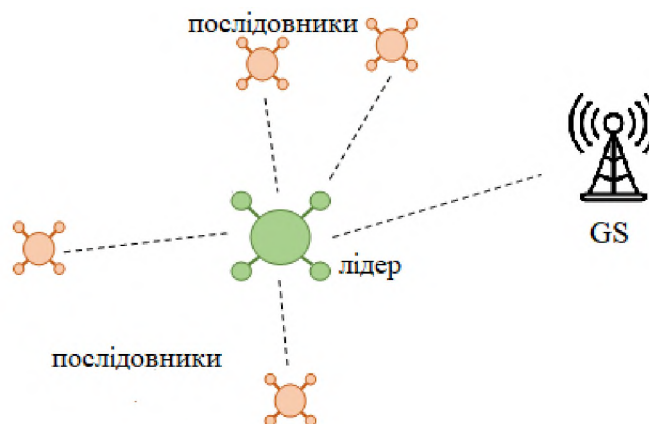


Рисунок 2.13 – Схема керування роєм

2.5 Розробка принципу роботи рою дронів

Підхід до проведення пошуко-рятувальної операції може значно відрізнятися в залежності від сукупності зовнішніх факторів, таких як: погодні умови, час доби, місце проведення пошуково-рятувальної операції, тощо. Загалом схеми пошуку можна поділити на чотири групи, до складу якої входять: візуальний пошук, електронний пошук, пошук в темний період доби, сухопутний пошук [11], [14]. Найбільш часто вживаним є візуальний пошук, який в свою чергу поділяється на:

- секторний пошук;
- пошук по квадратам, що розширюються;
- пошук з обстеженням лінії руху;
- контурний пошук.

Секторний пошук, наведено на рис. 1.2, застосовується коли точно відомо місце розташування об'єкта пошуку і район пошуку невеликий. Це дозволяє в найкоротші терміни і з найбільшою імовірністю виявити постраждалих і приступити до надання допомоги.

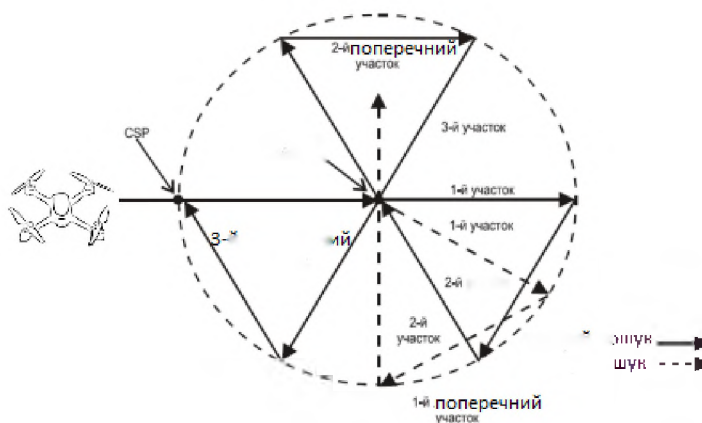


Рис. 2.14 - Схема секторного пошуку

Пошук по квадратах, що розширюються(рис.1.3) найбільш ефективний в тих випадках, коли місце розташування об'єкта пошуку відомо з відносно великою точністю. Однак у порівнянні з секторним пошуком він є більш ресурсозатратним та потребує більше часу.

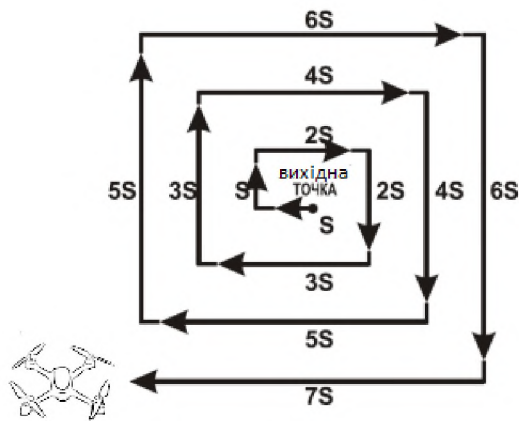


Рис. 2.15 - Схема пошуку по квадратах

Пошук з обстеженням лінії руху(рис. 1.4) застосовується у випадку, коли людина зникла без сліду при проходженні по відомому заздалегідь маршруту.

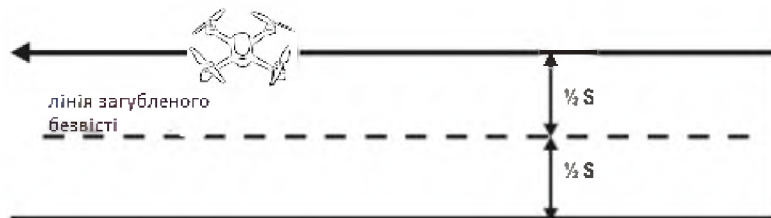


Рис. 2.16 - Схема пошуку з обстеженням лінії руху

Контурний пошук, наведено на рис. 1.5, застосовується, якщо надзвичайна ситуація відбулася в гірській місцевості.

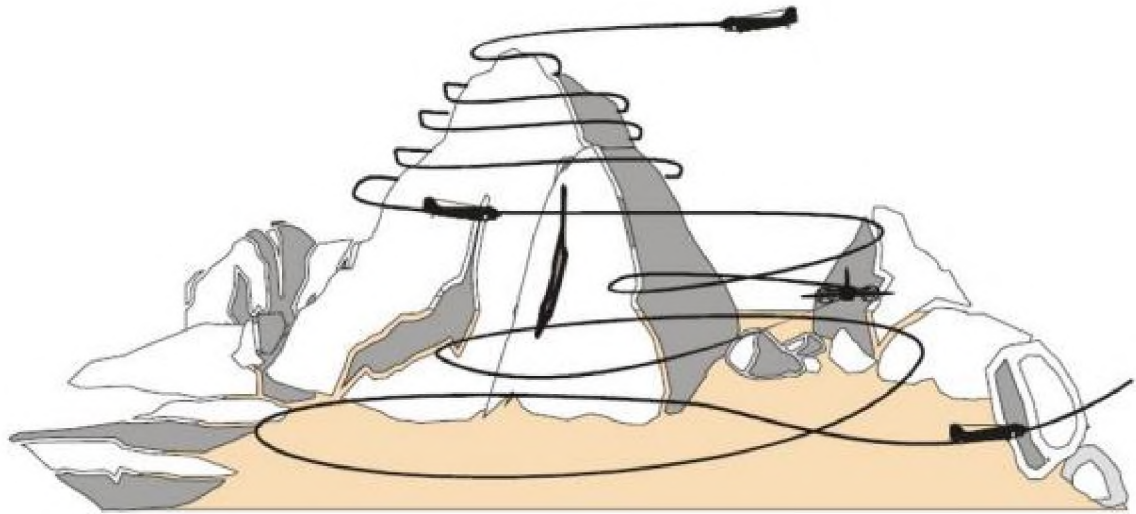


Рис. 2.17 - Схема контурного пошуку

Варто дотримуватися надзвичайної обережності в ході здійсненні пошуку в горах, каньйонах і долинах. Для такої операції використання дронів є особливо доцільним у зв'язку з високою маневреністю БПЛА та виключенням імовірності завдання шкоди екіпажу. Маршрут ми будемо задавати в планувальнику місій в Mission Planner.

Наприклад наша зона пошуку буде ліс виділений червоною областю на рис. 1.1. Так як ми знаємо область пошуку будемо використовувати пошук з обмеженими лініями руху, побудуємо маршрут для лідера, а послідовники будуть отримувати радіус в якому потрібно працювати, таким чином ми оглянемо територію повністю. Маршрут наведено на рис. 1.1.



Рисунок 2.18 – Схема маршруту пошуку

У кожного дрону буде свій радіус огляду і вони будуть триматися на відстані один від одного, наведено на рис. 1.1. Передавати інформацію вони будуть на наземну станцію, на якій слідкує людина. Коли дрон знайде людину він зповістить про це на наземну станцію. Робітник може взяти керування дрону на себе та «показати» людини вихід, якщо людина невзможі самостійно вибратися, то вже потім на місце відправляться спеціалісти для допомоги.

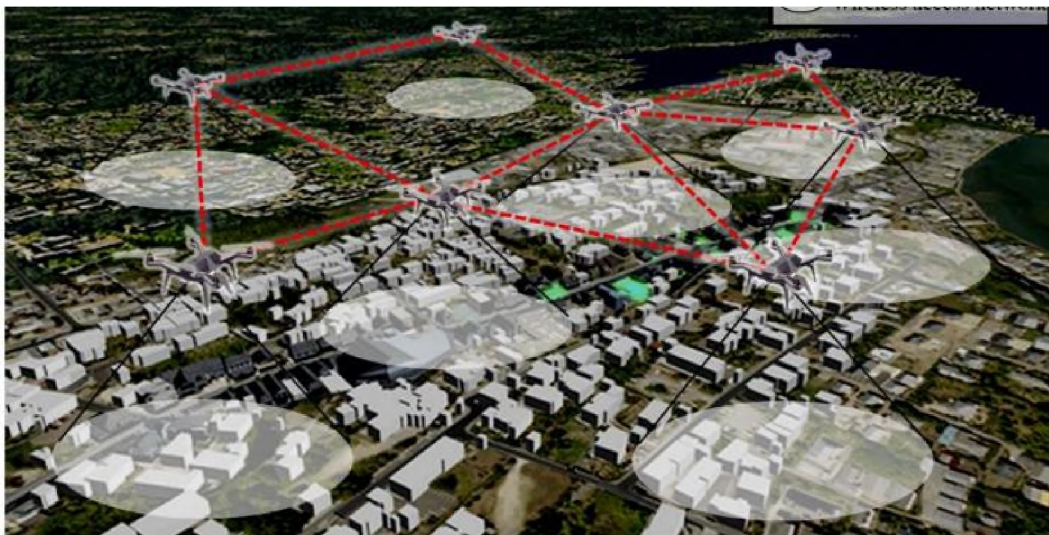


Рисунок 2.19 – Схема роботи рою дронів

2.6 Висновки до другого розділу

Зібраний дрон на базі каркасу Tarot Iron Man FY650 з використанням передових компонентів, таких як польотний контролер Pixhawk 4, мотори T-Motor U8 Lite KV170, пропелери 15-дюймові, акумулятори 6S 12000mAh, ESC Air 40A, камера DJI Zenmuse H20, а також плата розподілу живлення Matek PDB HEX 12S, є потужним і надійним інструментом для виконання пошуково-рятувальних операцій. Мотори: U3 Power Type UAV Motor KV700 забезпечують достатню тягу для стабільного польоту дрона з важким навантаженням, що дозволяє використовувати його в різноманітних умовах, включаючи складні погодні умови. Пропелери: P13*4.4 Prop забезпечують оптимальну аеродинамічну ефективність та знижений рівень шуму, що є важливим для пошуково-рятувальних операцій, де важлива точність і малопомітність. Система передачі відео: Herelink HD Video Transmission System забезпечує надійну передачу відео в режимі реального часу з високою роздільною здатністю, що значно підвищує ефективність моніторингу та керування операцією. GPS модуль: GPS M9N дозволяє отримувати точні координати місцезнаходження дрона, забезпечуючи стабільність польоту та можливість точного позиціонування, що є критичним для виконання завдань у важкодоступних або небезпечних зонах. Камера: DJI Zenmuse H20 забезпечує високу якість зображення та можливість зйомки в різних спектрах, включаючи тепловізійний режим, що дозволяє швидко виявляти та ідентифікувати об'єкти під час пошуково-рятувальних операцій. Плата розподілу живлення: Matek PDB HEX 12S забезпечує стабільне живлення всіх компонентів дрона, що сприяє зниженню ризику збоїв та підвищенню загальної надійності системи. Каркас: Tarot Iron Man FY650 забезпечує високу міцність та стабільність конструкції дрона, дозволяючи витримувати високі навантаження та забезпечувати тривалий час польоту.

3 ЕКОНОМІЧНІ РОЗДІЛ

3.1 Техніко-економічне обґрунтування дослідження і розробки

У цьому розділі проводяться економічні розрахунки витрат на дослідження та розробку групи дронів для пошуково-рятувальних операцій. Розглядаються наступні основні витрати: витрати на розробку, витрати на впровадження, загальні витрати. Таким чином, у цьому розділі необхідно детально розрахувати кожну категорію витрат, щоб отримати повне уявлення про економічну доцільність проекту.

Трудомісткість – це міра витрат праці, необхідних для виконання певного обсягу роботи або виробництва одиниці продукції. В даному контексті трудомісткість при дослідженні і розробці групи дронів для пошуково-рятувальних операцій визначається тривалістю кожної робочої операції (таблиця 3.1), починаючи зі збору та аналізу необхідної інформації і закінчуючи оформленням документації (за умови роботи одного чоловіка):

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} + t_{12} + t_{13} \quad (3.1)$$

Оцінка витрат праці на збір і аналіз інформації залежить від конкретних умов і визначається на основі експертних оцінок. Зважаючи на той факт, що дослідження, пов'язані з розробкою дронів для пошуково-рятувальних операцій, охоплюють великий обсяг інформації, представимо результати трудомісткості кожної операції в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Тривалість кожної робочої операції

Робоча операція	Тривалість
1. Збір і аналіз інформації	$t_1 = 15$ годин
2. Постановка задачі	$t_2 = 7$ години
3. Складання технічного завдання	$t_3 = 5$ години
4. Аналіз технічного завдання	$t_4 = 4$ години
5. Визначення основних параметрів системи	$t_5 = 5$ години
6. Аналіз методів побудови дронів	$t_6 = 4$ година
7. Вибір компонентів і модулів	$t_7 = 5$ годин
8. Налаштування програмного забезпечення	$t_8 = 10$ годин
9. Розробка імітаційної моделі дрона	$t_9 = 4$ година
10. Розробка структурної схеми дрона	$t_{10} = 7$ години
11. Тестування системи в реальних умовах	$t_{11} = 12$ годин
12. Збір готових бортів	$t_{12} = 25$ годин
13. Підготовка документації по завданню.	$t_{13} = 10$ годин

Отже, трудомісткість при дослідженні і розробці групи дронів для пошуково-рятувальних операцій розраховується за формулою 3.1 і складатиме:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} + t_{12} = 15 + 7 + 5 + 4 + 5 + 4 + 5 + 10 + 4 + 7 + 12 + 10 = 113 \text{ людино-годин.}$$

3.2 Визначення середньої заробітної плати спеціаліста в галузі розробки дронів.

Інженер з розробки дронів займається проектуванням, розробкою та тестуванням безпілотних літальних апаратів, налаштуванням і програмуванням їхніх систем управління, інтеграцією різних датчиків та модулів, а також забезпеченням надійної роботи дронів у польових умовах.

Підрахунок середньої заробітної плати:

- Представимо суму заробітної плати в Україні за кожен місяць протягом одного року, з січня 2023 року по грудень 2023 року: $29000 + 30000 + 31000 + 32000 + 33000 + 34000 + 35000 + 36000 + 37000 + 38000 + 39000 + 40000 = 444000$ грн/рік

- Розрахуємо середню заробітну плату за один місяць за формулою:

$$ЗП_{\text{сер}} = ЗП_{\text{рік}} / 12 \quad (3.2)$$

$$ЗП_{\text{сер}} = 444000 / 12 = 37000 \text{ грн/місяць}$$

- Розрахуємо середню заробітну плату за одну годину роботи, з урахуванням 8-годинного робочого графіку на добу і 5-денного робочого тижня:

1. Кількість робочих годин в місяць (підрахунок за місяць квітень, 30 днів в місяці): $22 \text{ робочих дні} \times 8 \text{ годин/день} = 176 \text{ годин/місяць}$.

2. Середня заробітна плата за одну годину роботи становить: 210 грн/годину

3.3 Розрахунок витрат на заробітну плату

Заробітна плата (оплата праці працівника) - винагорода за працю залежно від кваліфікації, складності, обсягу, якості та умов виконуваної роботи, а також

компенсаційні та стимулюючі виплати. Заробітна плата - грошова компенсація, яку працівник отримує в обмін на свою працю.

Заробітна плата виконавця враховує основну і додаткову заробітну плату, а також відрахування на соціальні потреби (пенсійне страхування, страхування на випадок безробіття, соціальне страхування тощо) і визначається за формулою:

$$З_{зп} = t \cdot З_{іт} , \text{ грн} \quad (3.3)$$

де t – загальна тривалість при дослідженні і розробці групи дронів для пошуково-рятувальних операцій, годин;

$З_{іт}$ – середньогодинна заробітна плата інженера в галузі розробки дронів, грн/годину.

Загальна тривалість робіт t , визначена у попередньому розділі, становить 88 людино-годин. Середньогодинна заробітна плата інженера в галузі розробки дронів становить 210 грн/годину.

Тоді заробітна плата виконавця, $З_{зп}$, розраховується наступним чином:

$$З_{зп} = t \cdot З_{іт} = 113 \cdot 210 = 23730 \text{ грн.}$$

Отже, витрати на заробітну плату при дослідженні і розробці групи дронів для пошуково-рятувальних операцій становитимуть 23730 грн.

3.4 Розрахунок витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення.

Розрахунок витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення при дослідженні і розробці групи дронів для пошуково-рятувальних операцій наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Вартість необхідного програмного та апаратного забезпечення

Позиція	Кількість	Вартість за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
Ноутбук Lenovo IdeaPad Slim 3 15AMN8	1	19000	19000
Операційна система Microsoft Windows 11 PRO	1	600	600
Каркас (Tarot Iron Man FY650)	5	4100	20500
Плата розподілу живлення Matek PDB HEX 12S	5	920	4600
Контролер польоту (Pixhawk 4)	5	5700	28500
Мотори (U3 Power Type UAV Motor KV700)	20	4750	95000
Регулятори швидкості (AIR 40A 2-6S ESC)	20	2250	45000
Пропелери (P13*4.4 Prop)	20	1600	32000
Камера (DJI Zenmuse H20)	5	150000	750000
GPS модуль (GPS M9N)	5	2200	11000
Система передачі відео (Herelink HD Video Transmission System)	5	36000	180000
Витратні матеріали (дроти, конектори)	5	2000	10000
Акумулятори (6S 12000mAh)	10	3800	38000
Разом			1234200

Загальні витрати на необхідне програмне та апаратне забезпечення для розробки групи дронів для пошуково-рятувальних операцій становлять 1234200 грн.

3.5 Розрахунок капітальних витрат

Під капітальними витратами розуміють усі витрати, які забезпечують підготовку й реалізацію проекту, включаючи формування або збільшення основних та оборотних коштів. Ці витрати не спрямовані на отримання прибутку принаймні протягом року і є довгостроковими вкладеннями. Залежно від виду і форми капітальних витрат, значення їх показників матиме різний економічний сенс. Це витрати на придбання довгострокових активів, які функціонують протягом тривалого періоду, з поступовою амортизацією вартості.

До капітальних витрат зазвичай відносять початкову вартість будівель та споруд (або поетапні витрати на їх встановлення), вартість нових машин та механізмів, придбання обладнання та приладів (крім малокоштовних та швидкозношувальних), а також вартість придбаних нематеріальних активів (патентів, ліцензій), що належать до поступового списання.

Таким чином, капітальні витрати на дослідження та розробку групи дронів для пошуково-рятувальних операцій складаються із витрат на заробітну плату та витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення.

$$23730 + 1234200 = 1257930 \text{ грн.}$$

3.6 Висновки до третього розділу

У даному економічному розділі проведено детальний аналіз витрат на дослідження та розробку групи дронів для пошуково-рятувальних операцій. Розраховано витрати на заробітну плату, необхідне програмне та апаратне

забезпечення, а також загальні капітальні витрати, які становлять 1257930 грн. Цей аналіз дозволяє обґрунтовано планувати бюджет проекту та забезпечити його економічну ефективність.

ВИСНОВОКИ

Об'єктом дослідження дипломного проекту були процеси комунікації дронів для виконання колективних завдань. Предмет дослідження складався з аналізу протоколів зв'язку дронів з метою оцінки їхньої ефективності для виконання колективних завдань. Метою проекту було дослідити та проаналізувати ефективність різних протоколів зв'язку дронів у контексті колективної роботи.

1. Досліджено протоколи зв'язку дронів, які забезпечують дротовий зв'язок між приймачем (RX) та контролером польоту (FC) і відіграють важливу роль у швидкості реакції дронів на команди пілота. Вибір протоколу залежить від вимог до швидкості передачі даних, кількості каналів, сумісності обладнання та умов експлуатації.

2. Протоколи ESC, такі як PWM, OneShot125, OneShot42, MultiShot та DShot, використовуються для забезпечення зв'язку між контролером польоту та ESC у квадрокоптері.

3. Розглянуто логіку та структуру роботи апаратно-програмного комплексу для дистанційного керування рухом квадрокоптерів. Існує декілька програм для дистанційного керування: ArduPilot, PX4, Cleanflight, Betaflight, INAV

4. Найбільш ефективний протокол, який забезпечить стабільну комунікацію між дронами в умовах реальних операцій – MAVLink.

5. Виконано розробку принципів роботи та динаміку руху літального апарату із застосуванням законів управління.

6. Виконано розрахунок капітальних витрат на розробку і впровадження системи зв'язку дронів для колективних завдань, які становлять 1257930 грн. Цей розрахунок дав змогу оцінити фінансові аспекти впровадження ефективної системи комунікації дронів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Положення про організацію атестації здобувачів вищої освіти НТУ «Дніпровська політехніка» / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 40 с.
2. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, затверджений наказом Міністерства освіти і науки України від 12.12.2018 р. № 1382.
3. Положення про систему запобігання та виявлення плагіату в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка», затвердженого Вченою радою 13.06.2018, протокол №8.
4. Салов В.О. Складання списку літератури в навчальних виданнях : посіб. для наук.-пед. працівників. М-во освіти і науки України. Нац. гірничий ун-т. –Дніпропетровськ: НГУ, 2013. 40 с.
5. ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 26 с.
6. Державний стандарт України. ДСТУ 8302:2015 “Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання” URL: <http://lib.npu.edu.ua/files/dstu-8302-2015.pdf> (дата звернення 10. 04. 2017).
7. Стандарти з інформації, бібліотечної і видавничої справи. URL: <http://wwwv.library.univ.kiev.ua/ukr/about/dstu.html> (дата звернення 3. 04. 2017).

8. ДСТУ ISO 5807:2016 Оброблення інформації. Символи та угоди щодо документації стосовно даних, програм та системних блок-схем, схем мережевих програм та схем системних ресурсів (ISO 5807:1985, IDT)
9. Даник, Ю. Г. Безпілотні літальні апарати: означення. Класифікація, стан та перспективи розвитку і використання. Космічна наука і технологія.— 2008, 2008, 1: 30-43.
10. SIGALOS, Athanasios, et al. Design of a Flight Controller and Peripherals for a Quadcopter. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 2019, 4.5: 463-470.
11. Ковальов, О. О., & Неклонський, І. М. (2023). Моделювання руху безпілотного літального апарату в зоні надзвичайної ситуації.
12. Яровий, О. В. (2018). Вибір оптимальних моделей безпілотних літальних апаратів та систем управління для виконання задач щодо моніторингу наземних об'єктів. *Молодий вчений*, (5 (1)), 190-196.
13. Liu, K. (2023). Learning-based defect recognitions for autonomous UAV inspections. *arXiv preprint arXiv:2302.06093*.
14. Jones, C. D. (2017). Practical Implementation of a UAV Communication Protocol Detection Algorithm in Noisy Environments Simulated Using Gaussian White Noise (Master's thesis, State University of New York at Binghamton).
15. Zuiev, A., Krylova, V., Hapon, A., & Honcharov, S. (2024). Research of microprocessor device and software for remote control of a robotic system. *Technology audit and production reserves*, 1(2/75), 31-37.
16. Coll-Perales, B., Gozálvez, J., & Friderikos, V. (2016). Context-aware opportunistic networking in multi-hop cellular networks. *Ad Hoc Networks*, 37, 418-434.

17. Sargious Shenouda, A. (2023). Study and development of UAV remote operations with flight-controller via air-link (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
18. FPV Protocols Explained (CRSF, SBUS, DSHOT, ACCST, PPM, PWM and more) URL: <https://oscarliang.com/rc-protocols/#FPV-Drone-Communication-System-Overview>
19. Overview of ESC Firmware and Protocols: How Flight Controllers and ESCs Communicate. URL: <https://oscarliang.com/esc-firmware-protocols/>
20. Introducing Oneshot ESC Protocol – Better FPV Drone Performance Than PWM. URL: <https://oscarliang.com/oneshot125-esc-quadcopter-fpv/>
21. BASICS OF UART COMMUNICATION. URL: <https://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/>,
<https://www.electronicshub.org/basics-uart-communication/>
22. BASICS OF THE I2C COMMUNICATION PROTOCOL. URL: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol>
23. Banerji, S., & Chowdhury, R. S. (2013). On IEEE 802.11: wireless LAN technology. arXiv preprint arXiv:1307.2661.
24. Serial Peripheral Interface (SPI). URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi/all>
25. Flight Controller Firmware for FPV Drone: Choosing Between Betaflight, iNav, Ardupilot. URL: <https://oscarliang.com/fc-firmware/>

ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи

№	Формат	Найменування	Кількість листів	Примітки
<i>Документація</i>				
1	A4	Реферат	2	
2	A4	Список умовних скорочень	3	
3	A4	Зміст	2	
4	A4	Вступ	1	
5	A4	Стан питання. Постановка задачі	42	
6	A4	Спеціальна частина	23	
7	A4	Економічний розділ	6	
8	A4	Висновки	4	
9	A4	Перелік посилань	3	
10	A4	Додаток А	1	
11	A4	Додаток Б	1	
12	A4	Додаток В	1	
13	A4	Додаток Г	1	

ДОДАТОК Б. Перелік документів на оптичному носії

1. Електронна версія пояснювальної записки (Пояснювальна записка Медведенко.doc та Пояснювальна записка Медведенко.pdf)

2. Електронна версія демонстраційного матеріалу (Презентація Медведенко.pdf)

ДОДАТОК В. Відгук керівника економічного розділу

ВІДГУК

Керівник розділу

(підпис)

Романюк Н. М.

ДОДАТОК Г. Відгук керівника кваліфікаційної роботи

ВІДГУК

на кваліфікаційну роботу бакалавра

**на тему: «Дослідження протоколів зв'язку дронів для виконання
колективних завдань»**

студента групи 172-20-1 Медведенко Лариси Андріївни

Керівник дипломної роботи,

Професор _____ Гусєв О.Ю.
(підпис)