

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань \_\_\_\_\_ 12 – Інформаційні технології \_\_\_\_\_


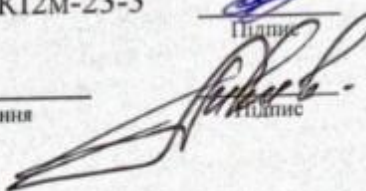
Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 –Комп'ютерна інженерія \_\_\_\_\_

на тему «Метод розроблення та налаштування системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку літальних апаратів»

КвРКІП. 303208.23.03.45 ПЗ

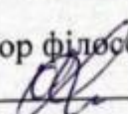
Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-3

Керівник \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент \_\_\_\_\_  
Науковий ступінь, вчене звання

  
Підпис  
  
Підпис

Максим ПСЬОЛ  
Ім'я, прізвище

Олексій ІВАНОВ  
Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри КІС, доктор філософії, доцент  
Ольга ПАВЛОВА   
22 05 2025 р.

Хмельницький, 2025

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга

ПАВЛОВА



“ 01 ” 09 2024 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Максиму ПСЬОЛУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод розроблення та налаштування системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку літальних апаратів

Керівник проекту (роботи) Олексій ІВАНОВ, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 08.01.2025 №8

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

Огляд технологій БПЛА

Технології зв'язку БПЛА

Програмування та налаштування подвійного зв'язку на FPV-дроні

Тестування і налагодження системи подвійного зв'язку

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

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Сергій ЛИСЕНКО, професор кафедри КПС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2024р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	01.09.2024	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2024	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	01.11.2024	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.12.2024	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2025	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2025	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2025	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2025	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2025	

Студент

  
Підпис

Максим ПСЬОЛ

Ім'я, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

Олексій ІВАНОВ

Ім'я, прізвище

## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Метод розроблення та налаштування системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку літальних апаратів.

Автор роботи: Псьол Максим.

Керівник роботи: Олексій Іванов, к.т.н., доцент.

Пояснювальна записка: 104 с., 29 рис., 3 табл., 3 дод., 85 джерел.

**МЕТОД РОЗРОБЛЕННЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМИ ОПЕРАТИВНОЇ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.**

Об'єктом дослідження є процес передавання відеоінформації від FPV-дрона до оператора керування в умовах інтенсивного радіочастотного навантаження, що є характерним для сучасного бойового середовища.

Предметом дослідження виступають алгоритми адаптації частотного каналу передачі радіосигналу та технічні засоби підвищення завадостійкості радіозв'язку FPV-дронів.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення надійності та завадостійкості радіозв'язку у FPV-системах шляхом розробки і впровадження адаптивного алгоритму вибору частотного каналу для передачі радіосигналу.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися система базується на неперервному аналізі якості радіозв'язку у реальному часі, з подальшим прийняттям рішення про перемикання частоти.

Наукова новизна методу зміни радіочастоти керування FPV-дроном полягає в розробці та впровадженні адаптивного, економічно доцільного та реального для практичного використання підходу до автоматизованого управління частотним каналом у системах дистанційного керування FPV-дронами, зокрема в бойових умовах. Основні новації методу:

- адаптивний алгоритм перемикання частоти керування на основі аналізу спектра у реальному часі;

- безперервна взаємодія між наземною станцією та бортовим обладнанням через CRSF;

- застосування у військових умовах та умовах активного глушіння.

На основі проведених досліджень розроблена архітектура та компоненти програмного забезпечення для EdgeTX, що реалізують прийняття рішень щодо оперативного перемикання частоти керування FPV-дроном. Система включає LUA-скрипт, який виконує моніторинг показників якості зв'язку (Link Quality, RSSI) у реальному часі, аналізує наявні канали у доступному частотному діапазоні ExpressLRS, та здійснює автоматичне або ручне перемикання частоти керування без втрати зв'язку.

Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості впровадження алгоритму автоматичної зміни частоти керування у вже наявні FPV-системи без апаратних змін. Такий підхід дозволяє ефективно реагувати на раптові погіршення якості каналу або активне глушіння сигналу, що критично важливо під час польотів у складному спектральному середовищі - наприклад, у зонах бойових дій із застосуванням радіоелектронної боротьби.

## ЗМІСТ

<b>СКРОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....</b>	<b>5</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>6</b>
<b>1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ БПЛА.....</b>	<b>8</b>
1.1 Що таке FPV-дрон .....	8
1.2 Основні компоненти FPV-дронів.....	9
1.3 Політний стек FPV-дронів.....	11
1.4. Використання FPV-дронів на війні.....	15
1.6 Радіохвилі .....	17
1.6 Радіозв'язок .....	21
1.7 Висновки першого розділу .....	22
<b>2 ТЕХНОЛОГІЇ ЗВ'ЯЗКУ БПЛА.....</b>	<b>24</b>
2.1 Протоколи зв'язку FPV-дронів .....	24
2.2 Оптиволоконні дрони .....	28
2.3 Смуга частот, які використовуєть у FPV-дронах .....	30
2.3.1 Частота 5.8 ГГц.....	30
2.3.2 Частота 2.4 ГГц.....	32
2.3.3 Частота 1.2 ГГц.....	34
2.3.4 Частота 915 МГц.....	35
2.3.5 Частота 433 МГц.....	36
2.4 Протокол зв'язку ELRS.....	38
2.5 Протокол зв'язку TBS CrossFire.....	41
2.6 Кастомні антени для різних частот.....	43
2.7 Методи боротьби із завадами .....	46

2.8	Подвійний радіозв'язок.....	48
2.9	Висновки другого розділу.....	51
<b>3</b>	<b>ПРОГРАМУВАННЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ ПОДВІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ FPV-ДРОНУ.....</b>	<b>53</b>
3.1	Загальне налаштування дрону.....	53
3.2	Налаштування зв'язку.....	67
3.2.1	Прошивка модулю ELRS RX.....	67
3.2.2	Прошивка модулю ELRS TX.....	78
3.3	Налаштування подвійного зв'язку.....	87
3.4	Висновки третього розділу.....	96
<b>4</b>	<b>ТЕСТУВАННЯ І НАЛАГОДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПОДВІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ.....</b>	<b>97</b>
4.1	Тестування системи у різних сценаріях.....	97
4.2	Аналіз тестування.....	101
4.3	Висновки четвертого розділу.....	105
	<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>107</b>
	<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>111</b>
	<b>ДОДАТОК А</b> Стаття конференції ХНТУ 2025.....	<b>119</b>
	<b>ДОДАТОК Б</b> Код прошивки FPV-дрону.....	<b>122</b>
	<b>ДОДАТОК В</b> Презентація.....	<b>125</b>

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БПЛА – Безпілотний Літальний Апарат

FPV (First Person View) – режим керування дроном з відео від першої особи

VTX (Video Transmitter) – відеопередавач, що передає зображення з дрона

RX (Receiver) – радіоприймач, що приймає сигнал керування або відео

TX (Transmitter) – передавач, що відправляє сигнал керування або відео

FC (Flight Controller) – контролер польоту, що стабілізує та керує дроном

ESC (Electronic Speed Controller) – електронний регулятор швидкості обертання моторів

OSD (On-Screen Display) – екранне відображення телеметрії у відеопотоці

GPS (Global Positioning System) – глобальна система позиціонування

LUA – скриптова мова програмування для автоматизації логіки в EdgeTX

CRSF (Crossfire Serial Protocol) – низькозатратний протокол зв'язку для передавання керування і телеметрії

ELRS (ExpressLRS) – відкритий протокол радіозв'язку з великою дальністю та низькою затримкою

LiPo (Lithium Polymer) – тип акумуляторної батареї з високим струмом віддачі

Li-Ion (Lithium Ion) – тип акумулятора з великою ємністю та стабільністю

PWM (Pulse Width Modulation) – імпульсна широтно-модульована передача сигналів

DSHOT (Digital Shot) – цифровий протокол керування моторами

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) – інтерфейс обміну даними між модулями

SPI (Serial Peripheral Interface) – послідовний інтерфейс для високошвидкісної передачі

True Diversity – система з двома незалежними приймачами для вибору кращого сигналу

## ВСТУП

Сучасні авіаційні та безпілотні літальні апарати (ЛА) відіграють ключову роль у різних сферах, включаючи військову, цивільну та науково-дослідну діяльність. Вони використовуються для виконання широкого спектра завдань, таких як розвідка, моніторинг навколишнього середовища, доставка вантажів, наукові дослідження та багато іншого. Для ефективного виконання цих завдань необхідний надійний і безпечний радіозв'язок, який забезпечує управління ЛА, обмін телеметричними даними та підтримку зв'язку між повітряними і наземними компонентами системи управління.

Важливість радіозв'язку для ЛА. Управління літальними апаратами: Надійний радіозв'язок дозволяє операторам керувати ЛА на відстані, забезпечуючи виконання завдань з високою точністю та ефективністю. Обмін телеметричними даними: Телеметрія надає інформацію про стан ЛА, таку як висота, швидкість, координати та стан систем. Це дозволяє операторам приймати обґрунтовані рішення та своєчасно реагувати на зміни умов польоту. Зв'язок між компонентами системи: Ефективний зв'язок між повітряними і наземними компонентами системи управління забезпечує координацію дій та підвищує загальну ефективність виконання завдань.

Виклики та проблеми радіозв'язку. У реальних умовах експлуатації радіозв'язок ЛА може стикатися з різноманітними викликами. Зовнішні перешкоди: радіосигнали можуть зазнавати впливу перешкод від інших джерел радіовипромінювання, що може призвести до втрати даних або зниження якості зв'язку. Зміни навколишнього середовища: погодні умови, рельєф місцевості та інші фактори можуть впливати на поширення радіохвиль, ускладнюючи підтримку стабільного зв'язку. Навмисне радіоелектронне придушення: у військових умовах противник може використовувати засоби радіоелектронної боротьби для придушення радіозв'язку, що вимагає від систем зв'язку високої стійкості до таких впливів.

Розроблення методів адаптації радіозв'язку. Для забезпечення надійного та стійкого радіозв'язку в умовах змінного радіочастотного середовища необхідно розробити гнучкі методи оперативної зміни параметрів радіозв'язку. Ці методи дозволяють адаптувати систему зв'язку до мінливих умов, підвищуючи її стійкість і надійність.

Основні методи адаптації. Динамічне виділення частот: використання алгоритмів для автоматичного вибору оптимальних частотних діапазонів, що дозволяє уникнути перешкод та забезпечити стабільний зв'язок. Адаптивна модуляція: зміна типу модуляції в залежності від умов передачі даних, що дозволяє підвищити стійкість до перешкод та зберегти якість зв'язку. Мережева редундантність: використання декількох каналів зв'язку для передачі одних і тих же даних, що збільшує ймовірність їх успішного приймання навіть у складних умовах. Інтелектуальні алгоритми управління: розробка алгоритмів, які аналізують стан радіочастотного середовища та приймають рішення про зміну параметрів зв'язку в реальному часі.

Аналіз ефективності запропонованих рішень. Для оцінки ефективності запропонованих методів адаптації радіозв'язку проводиться аналіз їх впливу на надійність та стійкість зв'язку в різних сценаріях. Це дозволяє визначити оптимальні алгоритми та параметри, які забезпечують найкращі результати в умовах реальної експлуатації. Таким чином, розроблення методів налаштування та оперативної зміни параметрів радіозв'язку є важливим завданням для забезпечення надійної та стійкої роботи сучасних авіаційних та безпілотних літальних апаратів у різних сферах застосування.

# 1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ БПЛА

## 1.1 Що таке FPV-дрон

FPV (First Person View) дрони - це безпілотні літальні апарати, які дозволяють пілоту бачити те, що бачить дрон, через спеціальні окуляри або монітор у реальному часі. Це створює ефект повного занурення, ніби сам знаходишся в кабіні дрона.

FPV дрони стають все більш популярними серед ентузіастів, спортсменів та професіоналів. Завдяки можливості керування дроном від першої особи, вони використовуються як у розважальних цілях, так і для зйомок, перегонів та інспекцій складних об'єктів.

FPV дрони оснащені камерою, яка передає відеосигнал у реальному часі на окуляри, монітор або інший дисплей. Використовується два типи відеотрансмісії. Аналогова - має мінімальну затримку, але поступається в якості зображення. Цифрова (наприклад, DJI Digital FPV) - забезпечує високу роздільну здатність та чіткість картинки. Пілоти використовують FPV-окуляри для максимального занурення в процес польоту. Популярні бренди: DJI, Fat Shark, Skyzone. Дрон управляється через радіопульт, що забезпечує зв'язок на відстані від кількох сотень метрів до кількох кілометрів, залежно від потужності передавача та умов середовища. FPV дрони можуть розвивати швидкість до 100-150 км/год та виконувати складні маневри, такі як перевороти, круті віражі, бочки та інші трюки. Більшість FPV дронів мають карбоновий каркас, що забезпечує міцність і витривалість при аваріях. Вони можуть бути як готовими до польоту (RTF - Ready to Fly), так і комплектами для самостійного складання.

Є декілька видів FPV дронів. Гоночні дрони призначені для швидкісних перегонів, мають легку конструкцію, потужні мотори та високу маневреність. Фрістайл дрони використовуються для виконання трюків та кінематографічної зйомки. Вони більш міцні, щоб витримувати удари під час тренувань. Цифрові FPV дрони забезпечують високоякісну відеопередачу та ідеальні для кінозйомки та професійного використання.

Серед основних компонентів FPV дрона можна виділити такі компоненти: рама - карбонова або пластикова основа, мотори та пропелери - забезпечують високу потужність і маневреність, контролер польоту (Flight Controller) - обробляє команди пілота та стабілізує дрон, акумулятор - LiPo батареї та LiIon батареї, що забезпечують 20-40 хвилин польоту, відеопередавач (VTX) - передає відеосигнал на FPV-окуляри, антени - забезпечують стабільний зв'язок.

Серед переваг ефект занурення - відчуття польоту від першої особи, творчість - можливість створення унікальних відео, швидкість та адреналін - польоти стають справжньою пригодою, гнучкість - можливість модифікації під різні завдання. Серед недоліків можна виділити складність навчання - потребує часу та практики, ризик аварій - великі швидкості збільшують шанси на поломки, ціна - якісні FPV-комплекти коштують від кількох сотень до тисяч доларів, обмежений час польоту - залежить від ємності акумулятора.

FPV дрони відкривають нові можливості для розваг, спорту та професійного використання. Вони дають змогу відчувати справжнє занурення у світ польотів, проте потребують певних навичок та обережності. Завдяки розвитку технологій, FPV-дрони стають доступнішими, потужнішими та якіснішими, що робить їх незамінним інструментом у різних сферах діяльності.

## 1.2 Основні компоненти FPV-дронів

Основні компоненти FPV-дрона - це сукупність характеристик, які визначають його здатність до польоту, керованість, якість відео, витривалість і реакцію на команди пілота. Від цих параметрів залежить, наскільки дрон буде швидким, стабільним, придатним до перегонів, фристайлу або далекого польоту. У різних конфігураціях ці характеристики можуть значно відрізнятись, але в цілому можна виділити кілька ключових аспектів, які формують основу FPV-платформи.

Передусім, важливою є рама дрона - її розмір і матеріал (здебільшого вуглепластик) впливають на міцність, вагу та аеродинаміку. Від розміру рами

залежить діаметр пропелерів, які можна встановити, а також габарити всього комплекту.

Наступний ключовий елемент - мотори, які відповідають за тягу. Вони характеризуються KV-показником - кількістю обертів за хвилину на один вольт. Високий KV дає більше обертів і швидкості, але менше моменту, а низький KV краще для великих гвинтів і потужності на низьких обертах. У поєднанні з регуляторами швидкості (ESC) мотори формують систему силової установки.

Політний контролер (FC) - це "мозок" дрона. Він зчитує дані з гіроскопа, акселерометра та інших сенсорів, обробляє сигнали з передавача, стабілізує політ і керує швидкістю обертання кожного мотора. Сучасні контролери можуть також мати барометр, GPS, blackbox і OSD для виведення телеметрії на відео.

Ще один критичний параметр - відеосистема. Це комбінація FPV-камери, відеопередавача (VTx) і антени. FPV-камера забезпечує зображення з мінімальною затримкою. VTx транслює сигнал у реальному часі на окуляри пілота, використовуючи частоти 5.8 ГГц або цифрові системи (наприклад, DJI). Якість картинки, стабільність відеозв'язку та дальність дуже залежать від потужності передавача і характеристик антени.

Керування дроном відбувається через радіосистему, що складається з передавача (пульта) та приймача на борту дрона. Вони працюють на частотах 2.4 ГГц, 915/868 МГц або рідше на 433 МГц. Сучасні протоколи - такі як ExpressLRS, Crossfire або Ghost - дозволяють забезпечити надійний зв'язок на великих дистанціях з мінімальною затримкою.

Акумулятор також є важливою складовою. Його тип (наприклад, LiPo або Li-Ion), кількість банок (3S, 4S, 6S), ємність (мА·г) та струм віддачі (C-рейтинг) визначають, скільки часу дрон зможе літати, і наскільки потужно він розганяється. Наприклад, 6S-батареї дають більше потужності для агресивного стилю польоту, а Li-Ion - краще підходять для дальніх маршрутів.

Не менш важливою є вага дрона. Вона впливає на час польоту, маневреність і навантаження на компоненти. Вага залежить від рами, акумулятора, двигунів, камер і всіх інших частин. Наприклад, легкий дрон на 250 грамів може літати

швидко і гнучко, а платформа вагою понад кілограм - краще тримає вітер і стабільніше в кадрі.

До другорядних, але важливих параметрів можна віднести систему OSD (екранна телеметрія), GPS-модуль (для повернення додому або waypoint-місії), камеру для запису відео у високій якості, а також захисти, LED-підсвітку, шумопоглиначі та інші аксесуари.

Загалом, FPV-дрон - це складна система, в якій кожен параметр тісно пов'язаний з іншими. Баланс між вагою, потужністю, дальністю, якістю відео та маневреністю - це результат ретельного підбору і налаштування компонентів під конкретні задачі пілота.

### 1.3 Політний стек FPV-дронів

Політний контролер (або FC - flight controller) у FPV-дроні виконує роль "мозку" всієї системи. Це мікрокомп'ютер, який зчитує інформацію з сенсорів, аналізує команди пілота з радіоуправління і керує роботою кожного мотора так, щоб дрон залишався стабільним у повітрі, реагував на рухи стиків і виконував складні маневри. Без політного контролера дрон не зміг би утримуватись у повітрі, а тим більше - літати точно, швидко й керовано. Політний контролер показано на рисунку 1.1.

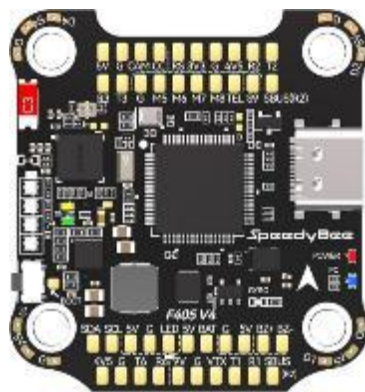


Рисунок 1.1 - Політний контролер SpeedyBee F405 V4 [32]

Усередині політного контролера знаходяться основні сенсори: гіроскоп, акселерометр, а іноді й барометр або компас. Гіроскоп визначає кутові швидкості, тобто наскільки швидко дрон обертається навколо кожної з трьох осей. Акселерометр фіксує прискорення - по суті, допомагає FC "розуміти", куди дрон рухається в просторі. На основі цих даних контролер формує сигнали для ESC (регуляторів швидкості), які в реальному часі змінюють оберти кожного мотора, щоб стабілізувати політ.

Сучасні контролери мають дуже швидкі процесори - зазвичай серії STM32 - і працюють на частотах в сотні мегагерц. Вони підтримують прошивки типу Betaflight, INAV, ArduPilot або KISS - кожна з яких має свої особливості й підходить для різних стилів польоту: від агресивного фристайлу до точного автопілота з GPS.

Окрім стабілізації, політний контролер також керує багатьма додатковими функціями. Він обробляє телеметрію, виводить дані на OSD (напр., швидкість, рівень заряду, GPS-координати), взаємодіє з системою керування польотом (наприклад, режимами Angle, Acro, Horizon), а також може приймати сигнали з GPS, компаса, датчиків висоти, оптичного потоку тощо. Через нього також здійснюється ARM/Disarm дрона, перемикання режимів, керування світлодіодами, buzzer-ом, зміна PID-налаштувань та багато іншого.

Контролер також виступає центром комунікацій між різними компонентами - камерами, VTx, радіоприймачем, GPS, LED-стрічками, сенсорами. Саме він координує ці модулі через UART, I2C, SPI та інші інтерфейси. У складніших збірках один FC може поєднуватися з окремим блоком ESC (4-в-1 або окремими), або бути частиною так званого stack, де FC і ESC розташовані один над одним і з'єднані через спеціальний конектор.

Загалом, без добре налаштованого політного контролера FPV-дрон або буде некерованим, або нестабільним, або просто не злетить. Саме завдяки FC дрон "розуміє", як тримати горизонт, як відреагувати на різке відхилення стика, і як утримуватись у повітрі навіть під час складних фігур або вітру. Це центр прийняття рішень, який перетворює сигнал від пілота на точні, миттєві дії кожного мотора.

ESC (Electronic Speed Controller) - це електронний регулятор швидкості, який відповідає за керування обертами кожного мотора дрона. У FPV-дронах ESC - це критично важливий компонент, адже саме він виконує команди політного контролера, перетворюючи їх на точне обертання пропелерів. Від якості та швидкості роботи ESC залежить, наскільки точно і швидко дрон реагує на дії пілота, чи буде він стабільним у повітрі, і наскільки ефективно витрачатиме енергію. Регулятор моторів показано на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Електронний регулятор швидкості SpeedyBee F405 V4 [32]

ESC отримує сигнали з політного контролера і керує струмом, який подається на мотор. Він працює за принципом імпульсної широтно-частотної модуляції (PWM або сучасніші DShot-протоколи), подаючи на обмотки двигуна послідовності високочастотних електричних імпульсів, які утворюють обертове магнітне поле. Це поле змушує безколекторний мотор обертатися з потрібною швидкістю.

У FPV-дронах зазвичай використовують або 4 окремих ESC (по одному на кожен мотор), або один 4-в-1 ESC, який об'єднує всі чотири регулятори на одній платі. Варіант "4 в 1" популярний у компактних збірках, бо дозволяє зекономити місце, спростити монтаж і зменшити вагу. Проте окремі ESC іноді краще охолоджуються і простіше замінюються при поломці одного з них.

ESC мають кілька ключових технічних характеристик. Перша - це максимальний струм, який регулятор здатен витримати. Наприклад, 35A або 45A - це значення постійного струму, який ESC може стабільно подавати на мотор.

Також вказується піковий струм, який ESC може витримати короткий час (наприклад, 50А протягом кількох секунд). Ці параметри повинні відповідати двигунам і акумулятору, інакше можливе перегрівання або навіть вихід з ладу.

Друга важлива характеристика - підтримувана кількість банок акумулятора (S). Наприклад, ESC може бути сумісний з 3S-6S, тобто працювати на напрузі від 12.6 В до 25.2 В. Вибір відповідного ESC залежить від системи живлення дрона.

Ще один критичний параметр - це протокол зв'язку з політним контролером. Раніше використовували аналогові сигнали типу PWM або OneShot, але сьогодні домінують цифрові протоколи DShot (DShot150, 300, 600, 1200). DShot є точнішим, швидшим і стабільнішим, не потребує калібрування і дозволяє зворотний зв'язок (наприклад, передавання даних ESC назад до FC).

У більшості сучасних ESC також є телеметрія: вони можуть передавати інформацію про температуру, споживання струму, напругу і навіть швидкість обертання мотора. Це дає змогу пілоту контролювати стан силової системи у реальному часі.

ESC часто мають вбудовану захист від перенавантаження, короткого замикання та перегріву, що підвищує надійність дрона в складних умовах. Деякі навіть можуть знижувати подачу потужності або вимикати мотор у разі критичних показників, щоб уникнути займання або поломки.

Щодо фізичних характеристик, ESC виготовляються з урахуванням ефективного тепловідведення: їх часто покривають термопрокладками або мідними радіаторами. У high-end варіантах використовуються якісні компоненти, що дозволяють витримувати значні навантаження без перегріву навіть у дронів для перегонів або фристайлу.

Загалом, ESC - це той компонент, що стоїть на передовій лінії між акумулятором і моторами. Його роль - миттєво реагувати на команди, точно дозувати енергію, і при цьому не перегріватися та не виходити з ладу. У правильному поєднанні з політним контролером, двигунами і акумулятором ESC забезпечує потужність, стабільність і контроль - усе, що потрібно FPV-дрону для точного та ефективного польоту.

#### 1.4. Використання FPV-дронів на війні

Українські військові активно застосовують FPV-дрони практично із самого початку повномасштабного російського вторгнення. Ними оперують різні підрозділи ЗСУ, Нацгвардії, СБУ та Сили спецоперацій і бійці ГУР й інші підрозділи. Зазвичай військові діють невеликими групами, з операторів і їх помічників. Іноді FPV дрони-камікадзе або зі скидом, діють у парі з розвідувальними коптерами - це забезпечує більшу ефективність застосування та ситуаційну обізнаність для операторів.

У 2022 році такі дрони під потреби військових почали масово збирати та закуповувати вже готові різні волонтерські ініціативи, а потім до цього процесу доєдналися і приватні підприємства.

На фронті дрони з високою точністю залітають у ворожі бліндажі, люки танків та бронемашин і автомобілів.

Одна з великих переваг FPV-дронів - їхня ціна і висока точність застосування. Найкращі моделі коштують удвічі дешевше за звичний квадрокоптер Mavic. До прикладу, безпілотник, що коштує до 1000 доларів здатен нести на собі заряд, який у разі успішного влучання може уразити і навіть повністю знищити БМП чи танк противника вартістю кілька мільйонів.

Спочатку волонтерські групи та приватні виробники використовували комплектуючі куплені переважно в Китаї. Зараз виробництво поставлено на потік, і йдеться вже про тисячі FPV-дронів на місяць. Виробники наразі працюють над диверсифікацією постачання деталей і налагодження випуску окремих складових вже в Україні, щоб бути менше залежними від зовнішнього ринку.

У липні в Міністерстві оборони України повідомили, що, починаючи з лютого 2022 року, взяли на озброєння чи в експлуатацію 28 моделей безпілотників різних типів від українських виробників.

«Серед них, у тому числі, 9 моделей дронів-камікадзе, серед яких 3 літакового типу, а також 6 моделей FPV-дронів. Загальна кількість поставлених до

Збройних сил України БПЛА і дронів в рамках закупівель Міноборони налічує тисячі одиниць», - йшлося в повідомленні.

За твердженням відомства, після спрощення процедури для виробників восени минулого року термін прийняття нової техніки в експлуатацію скоротився з двох років до кількох тижнів.

У серпні 2023 року, радник міністра з питань стратегічних галузей промисловості Ярослав Олійник на конференції iForum, повідомив, що вже три вітчизняні державні заводи почали виробництво FPV-дронів.

Також він наголосив, що Мінстратегпром працює для масштабування та розвитку ринку українських БПЛА, шукаючи шляхи партнерства державних та приватних виробників. Крім того, проводиться локалізація виробництва комплектуючих в Україні та співпраця з міжнародними інвесторами, фондами і виробниками.

Дрон почали розробляти з літа минулого року. У команду зібралися односторонці, серед яких були інженери та військові, що раніше разом цікавилися та роками займалися БПЛА, як хобі.

Заявлено, що FPV-дрон КН-S7 несе штатно корисну вагу в 1 кілограм на відстань 7 км, потужності вистачає і на більше, але є багато умов. За словами розробників, цей безпілотник українські військові застосовували на дальності 9,5 кілометрів. Виробник зараз займається масштабування випуску дронів для задоволення наявних потреб українського війська.

Також в Україні працюють над FPV-дронами з самонаведенням. Зокрема, у цьому напрямку працюють фахівці компанії AirUnit. У компанії пояснюють, що за умови наявності такої системи, оператору БПЛА потрібно буде лише захопити ціль виділивши об'єкт на екрані, далі в справу вступить програмне забезпечення.

При наявності такої системи вирішується проблема втрати зв'язку і промаху дрона, що може статися під час пікірування на ціль.

В Україні також розробляють і виготовляють боеприпаси для скиду з FPV-дронів. Зокрема, волонтери з проєкту «Сталеві Шершні» створили спеціальний

шрапнельний боєприпас з готовими уражаючими елементами у вигляді металевих кульок, призначений для боротьби з живою силою противника.

Для завдання ударів з повітря за допомогою нових боєприпасів оператори БПЛА використовують метод пікірування. Такий підхід до застосування дає змогу використовувати FPV-безпілотники по кілька разів.

Перед цим в Україні офіційно вивели в окрему категорію боєприпаси для безпілотників. Наразі українські безпілотники застосовують кустарно адаптовані для скидання з розвідувальних БПЛА/підвісу під FPV-дрон штатні боєприпаси, а також саморобні вироби сумнівної якості.

## 1.6 Радіохвилі

Радіохвилі - це частина електромагнітного спектра, що охоплює хвилі з довжиною понад приблизно 1 міліметр. Як і всі інші електромагнітні хвилі, у вакуумі вони поширюються зі швидкістю світла, тоді як в атмосфері Землі їх швидкість дещо нижча. Радіохвилі виникають у результаті руху заряджених частинок із прискоренням, зокрема під дією змінного електричного струму. У природних умовах джерелами радіохвиль є блискавки, астрономічні об'єкти, що випромінюють радіохвилі, а також будь-які нагріті тіла, які випромінюють тепло.

Радіохвилі застосовуються не лише для традиційного радіомовлення, а й у системах радіолокації, для дослідження космосу, аналізу середовища їх поширення, а також у радіометеорології.

Хвилі з довжиною 100-10 км (частотою 3-30 кГц) класифікуються як наддовгі (НДХ), а хвилі довжиною 10-1 км (30-300 кГц) - як довгі (ДХ). Вони поширюються вздовж земної поверхні у відкритому просторі як удень, так і вночі, та майже не поглинаються водою. Завдяки цим властивостям наддовгі хвилі підходять, наприклад, для забезпечення зв'язку з підводними човнами. Проте, такі хвилі суттєво втрачають потужність із відстанню, тому для їх ефективної передачі потрібні дуже потужні передавачі.

Хвилі з довжиною 1000–100 метрів (частота 0,3–3 МГц), які називають середніми (СХ), удень значною мірою поглинаються іоносферою - верхнім шаром атмосфери з високим вмістом іонів, тому сигнал швидко слабшає. Натомість уночі ці хвилі відбиваються від іоносфери, що дозволяє їм поширюватися на значно більші відстані. Середні хвилі здебільшого використовують для радіомовлення: вдень добре приймаються сигнали лише від найближчих станцій, а вночі - і від дуже далеких.

Короткі хвилі (КХ), з довжиною 100–10 метрів (частота 3–30 МГц), також відбиваються від іоносфери та досягають приймальної антени після кількох відбиттів. У денний час краще відбиваються хвилі меншої довжини, а вночі - довші. Для таких хвиль можливо створювати спрямовані антени, які фокусують електромагнітне випромінювання в вузький промінь, завдяки чому посилюється сигнал, що надходить до приймача. Короткі хвилі активно використовуються у радіозв'язку - зокрема в морському, авіаційному та іншому транспорті, а також для міжнародного радіомовлення.

Ультракороткі хвилі (УКХ), довжина яких становить від 10 метрів до 0,3 міліметра (частота в межах 30 МГц – 1 ТГц), не відбиваються і практично не поглинаються іоносферою. Вони проходять крізь неї подібно до світла й спрямовуються в космос. Через це зв'язок із використанням УКХ можливий лише в межах прямої видимості - коли між передавальною та приймальною антенами немає перешкод (наприклад, будівель, гір або викривлення земної поверхні).

Піддіпазони радіохвиль наведено у таблиці 1.1.

Випромінювання та прийом. Радіохвилі випромінюються зарядженими частинками під час їх прискорення. Природні джерела радіохвиль включають радіошум, створений блискавкою та іншими природними процесами в атмосфері Землі, а також астрономічні джерела радіохвиль у космосі, такі як Сонце, галактики та туманності. Усі теплі об'єкти випромінюють високочастотні радіохвилі (мікрохвилі) як частину випромінювання чорного тіла.

Таблиця 1.1 - Піддіапазони радіохвиль

Піддіапазон	Довжина хвилі,	Частота коливань,
	м	Гц
Наддовгі хвилі	Більша $10^4$	Менша $3 \cdot 10^4$
Довгі хвилі	$10^4 - 10^3$	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$
Середні хвилі	$10^3 - 10^2$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$
Короткі хвилі	$10^2 - 10$	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$
Метрові хвилі	$10 - 1$	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$
Дециметрові хвилі	$1 - 10^{-1}$	$3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$
Сантиметрові хвилі	$10^{-1} - 10^{-2}$	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$
Міліметрові хвилі	$10^{-2} - 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$
Субміліметрові хвилі	$10^{-3} - 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{12}$

Радіохвилі створюються штучно змінними в часі електричними струмами, що складаються з електронів, які рухаються у металевому провіднику спеціальної форми, який називається антеною. Електронний пристрій під назвою радіопередавач подає коливальний електричний струм до антени, а антена випромінює потужність у вигляді радіохвиль. Радіохвилі приймаються іншою антеною, приєднаною до радіоприймача. Коли радіохвилі потрапляють на приймальну антену, вони рухають електрони в металі, створюючи маленькі коливальні струми, які реєструються приймачем.

З точки зору квантової механіки, як і інше електромагнітне випромінювання, наприклад світло, радіохвилі можна розглядати як потоки незаряджених елементарних частинок, які називаються фотонами. В передаючій антені електрони випромінюють енергію окремими порціями, які називаються

радіофотонами, а в приймальній антені електрони поглинають енергію як радіофотони. Антена є когерентним випромінювачем фотонів, як лазер, і всі радіофотони знаходяться в фазі. Однак за формулою Планка-Ейнштейна енергія окремих радіофотонів надзвичайно мала, від  $10^{-22}$  до  $10^{-30}$  джоулів, і навіть у передавачі дуже малої потужності антена випромінює величезну кількість фотонів за секунду. Тому випромінювання та поглинання радіохвиль зазвичай розглядають як неперервний класичний процес, що описується рівняннями Максвелла. Відомим винятком, коли випромінювання і поглинання радіохвиль доводиться розглядати з квантової точки зору, є радіолінії окремих атомів і молекул в радіоастрономії.

В однорідному середовищі радіохвилі поширюються прямолінійно зі сталою для даного середовища швидкістю - так зване вільне поширення. Близьким до вільного є поширення радіохвиль в космічному просторі. На поширення в атмосфері і в товщі Землі, при відсутності спрямовуючих систем типу хвилеводів, впливають електродинамічні властивості атмосфери і земної кори, кривина земної поверхні і нерівності її рельєфу. Вплив атмосфери зумовлюється наявністю в ній плазми, в її верхніх шарах, та речовин, в основному кисню і водяної пари, що сильно поглинають сантиметрові й міліметрові радіохвилі; вплив земної кори - збудженням у ній радіохвилею електричного струму, на що витрачається частина енергії хвилі. Кривина земної поверхні і нерівності її рельєфу є причиною дифракції радіохвиль. Помітно дифрагують лише наддовгі та довгі радіохвилі. Коротші радіохвилі поширюються прямолінійно й огинають земну поверхню внаслідок відбивання від іоносфери, яка є відбивним середовищем для радіохвиль від наддовгих до коротких. Короткі радіохвилі, багаторазово відбиваючись від іоносфери і поверхні Землі, поширюються у своєрідному сферичному радіохвилеводі, стінками якого є нижня границя іоносфери і земна поверхня. Такі хвилі здатні забезпечувати радіозв'язок між найвіддаленішими пунктами Землі. З відбиванням радіохвиль від іоносфери пов'язане і явище завмирання радіосигналу, що пояснюється наявністю в ній зон з неоднаковими густиною й електричним зарядом. Для метрових і дециметрових хвиль іоносфера практично прозора. На цих хвилях підтримується зв'язок з літальними апаратами, які перебувають за межами

іоносфери. Завдяки прозорості іоносфери для таких хвиль виявлено радіовипромінювання від неземних джерел, що дало поштовх розвитку радіоастрономії.

Радіохвилі були вперше передбачені теорією електромагнетизму, запропонованою в 1867 році шотландським фізиком-математиком Джеймсом Клерком Максвеллом. Його математична теорія, яка зараз називається рівняннями Максвелла, передбачила, що пов'язані електричне та магнітне поля можуть поширюватися в просторі як «електромагнітна хвиля». Максвелл припустив, що світло складається з електромагнітних хвиль дуже короткої довжини хвилі. У 1887 році німецький фізик Генріх Герц продемонстрував реальність електромагнітних хвиль Максвелла, експериментально генеруючи радіохвилі у своїй лабораторії, показавши, що вони виявляють ті самі хвильові властивості, що й світло: стоячі хвилі, заломлення, дифракцію та поляризацію. Італійський винахідник Гульєльмо Марконі розробив перші практичні радіопередавачі та приймачі близько 1894-1895 років. У 1909 році він отримав Нобелівську премію з фізики за роботу в галузі радіо. Радіозв'язок почав використовуватися в комерційних цілях близько 1900 року. Сучасний термін «радіохвиля» замінив оригінальну назву «хвиля Герца» приблизно в 1912 році.

## 1.6 Радіозв'язок

В залежності від діапазону радіохвилі мають свої особливості та закони розповсюдження.

ДХ сильно поглинаються іоносферою, основне значення мають приземні хвилі, які розповсюджуються, огинаючи землю. Їх інтенсивність по мірі віддалення від передавача зменшується порівняно швидко.

СХ сильно поглинаються іоносферою вдень, район їх дії визначається приземною хвилею, ввечері добре відбиваються від іоносфери і район дії визначається відбитою хвилею.

КХ розповсюджуються виключно відбиттям від іоносфери, тому навколо передавача існує т. з. мертва зона. Вдень краще розповсюджуються більш короткі хвилі (30 МГц), вночі - більш довгі (3 МГц). Короткі хвилі можуть розповсюджуватися на великі відстані при малій потужності передавача.

УКХ розповсюджуються в ідеальних умовах по прямій як світло. При проходженні УКХ через іонізовані ділянки атмосфери (грозова активність, магнітні бурі на Сонці) вони зазнають менших втрат і радіозв'язок може відбуватися на більшій відстані.

Частотна сітка на основі вищеописаної інформації наведена у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Частотна сітка, використовувана у радіозв'язку.

Довгі хвилі (ДХ)	$f = 150-450$ кГц	$(\lambda = 2000-670$ м)
Середні хвилі (СХ)	$f = 500-1600$ кГц	$(\lambda = 600-190$ м)
Короткі хвилі (КХ)	$f = 3-30$ МГц	$(\lambda = 100-10$ м)
Ультракороткі хвилі (УКХ)	$f = 30$ МГц - $300$ МГц	$(\lambda = 10-1$ м)

Розповсюдження радіохвиль від джерела до приймача може відбуватися декількома шляхами одночасно. Таке розповсюдження має назву багатопроменевість. Як наслідок багатопроменевості та зміни параметрів середовища, виникають завмирання (англ. fading) - зміна рівня отриманого сигналу у часі. При багатопроменевості зміна рівня сигналу відбувається внаслідок інтерференції, тобто у точці прийому електромагнітне поле є сумою зміщених у часі радіохвиль одного й того ж сигналу.

## 1.7 Висновки першого розділу

У першому розділі було здійснено комплексний огляд сучасних технологій, пов'язаних із FPV-дронами та особливостями їх функціонування. Розглянуто поняття FPV-дрона як типу безпілотного літального апарата, що забезпечує управління в режимі реального часу за допомогою відеосигналу від першої особи.

Детально проаналізовано основні компоненти таких дронів, зокрема політні контролери, відеопередавачі, антени, ESC-регулятори та інші елементи політного стеку, що визначають ефективність і надійність апарата.

Особливу увагу приділено бойовому застосуванню FPV-дронів, яке набуло значного поширення під час війни в Україні. Встановлено, що ці дрони є високоточним, мобільним та економічно вигідним інструментом для ураження цілей і виконання розвідувальних завдань.

Окремим напрямом дослідження стали характеристики радіохвиль та принципи радіозв'язку, які лежать в основі управління FPV-дронами. Проаналізовано частотні діапазони, типи модуляцій та параметри, що впливають на стабільність зв'язку, включаючи вплив перешкод і факторів навколишнього середовища.

## 2 ТЕХНОЛОГІЇ ЗВ'ЯЗКУ БПЛА

### 2.1 Протоколи зв'язку FPV-дронів

Безпілотників стає все більше і більше з кожним днем, питання дронів стало питанням нашого виживання, і всі вони керуються за допомогою радіохвиль, тому правильний вибір та розуміння антен стає критично необхідним для успішних та безперервних польотів.

Потрібно зазначити, що тема дуже складна, її неможливо пояснити в межах коротенького блогу, оскільки читачу потрібні базові знання з радіотехніки, але ми допоможемо розібратись в основних поняттях і вказати правильний напрямок для самостійного вивчення теми. Також зауважте, що в умовах війни практика застосування радіозв'язку постійно змінюється і вдосконалюється, статичною залишається лише теорія радіохвиль.

Радіохвилі. Отже, варто розпочати з того, що для дрону потрібен радіозв'язок по двох незалежних каналах. Один - для керування дроном, інший - для передачі відеосигналу на окуляри оператора. Для обох каналів використовуються антени різних типів, які відрізняються в першу чергу частотою, на якій працює сигнал. Крім цього антени мають різну поляризацію, діаграму направленості, коефіцієнт підсилення. Давайте спробуємо розібратись.

Перше, що треба розуміти - це поляризація сигналу. По суті це спосіб поширення радіохвиль, і він буває двох типів - лінійний або круговий. Лінійна поляризація, в свою чергу, буває вертикальна і горизонтальна, а кругова поділяється на ліву і праву, за напрямком руху годинникової стрілки. Тобто ви не можете взяти будь-які дві антени, розмістити їх як завгодно і очікувати що між ними буде зв'язок.

Керування дронами. Тепер подивимось, як це все використовується в радіокеруванні безпілотниками. Для передачі управляючого радіосигналу від пульта пілота на дрон стандартно використовуються частоти в діапазоні 900МГц (868 та 915) або 2.4ГГц з лінійною поляризацією. Буде вона вертикальна чи горизонтальна - обирати пілоту, за допомогою повороту антен. Тут потрібно

розуміти, що коли на пульті досить легко можна повернути антену, то на дроні для цього має бути передбачена спеціальна поворотна система, але як правило її немає, тому вибір скорочується до однієї опції - більшість FPV управляються за допомогою радіохвиль з горизонтальною поляризацією.

Що буде, якщо на передавачі і приймачі буде різна лінійна поляризація антен? Фізика радіохвиль говорить, що втрата сигналу при перпендикулярній поляризації антен складе 20 дБ, тобто відбудеться майже повна втрата керування. На практиці, коли дрон нахилиється, кут між поляризаціями значно менший, відповідно втрати сигналу залишаються прийнятними, що дозволяє зберегти керування дроном.



Рисунок 2.1 - Приймач радіосигналу на дрон (RX) [33]



Рисунок 2.2 - Передавач радіосигналу з пульту (TX) [34]

Передача відеосигналу. Відеосигнал з камери дрона переважно передається на частотах 1.2 та 5.8 ГГц, за допомогою антен з правою круговою поляризацією. Чому з правою? - бо так склалось історично. Є легенди що права використовується для передачі аналогового відео а ліва для цифрового, але це лише легенди. Нічого не заважає літати на дроні з антеною лівої кругової поляризації, але для цього відеоприймач також має мати відповідну антену. Втрати сигналу при неспівпадінні напрямку поляризації - ті ж самі 20дБ, з різними антенами зображення майже не буде. Слід зауважити, що втрати сигналу між антенами кругової і лінійної поляризації складають приблизно 3дБ, і круговий відеосигнал можна приймати лінійною антеною при достатньо великому коефіцієнті підсилення сигналу, але про це трохи далі. Відеопередавач показано на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 - Відеопередавач Rush Max Solo [35]

Це все гарно і просто працює в розважальних польотах (які, нагадаю, зараз заборонені) на прибудинковій території. На практиці у нас війна, дронам приходится літати далеко, а радіосигналам треба проходити, незважаючи на перешкоди та засоби РЕБ. Отже, що заважає дрону облетіти землю? - вірно, це її кругла форма. Коли відлітаєте достатньо далеко, щоб дрон зайшов за радіогоризонт, втрачаєте сигнал. Також його втрачаєте коли залітаєте за пагорб чи багатоповерхівку з армованих панелей - природні чи рукотворні перешкоди теж спричиняють втрату сигналу.

Наскільки сильна ця втрата сигналу - відповісти важко, а в бойових умовах - неможливо. Радіохвилі різної частоти по різному огинають перешкоди, але загальне правило таке, що чим більша довжина хвилі (відповідно, менша частота)

- тим краще огинаються перешкоди. Хвилі метрового діапазону з частотою менше 30МГц взагалі можуть поширюватись по поверхні землі, але ж ми літаємо на значно вищих частотах. Тут зберігається те ж саме правило - прохідність сигналу керування 900МГц буде кращою за прохідність сигналу відеозв'язку в 5800МГц.

Польоти на більші відстані. Знову трохи теорії. Зазвичай на дронах використовуються всенаправлені антени - це такі, які передають і приймають приблизно однаково у всіх напрямках. Адже дрон повертається як завгодно, і важливо зберегти керування ним незалежно від орієнтації щодо пілота. Так само на пультах і відеоприймачах зі сторони оператора базово передбачені всенаправлені антени, сигнал яких затухає приблизно однаково у всіх напрямках, але що нам заважає сфокусувати сигнал в одному керунку, і таким чином добитись його передачі/прийому на більші відстані? Відповідь - не заважає нічого окрім наявності відповідного заліза. Більше того, на фронті без направлених ретрансляторів застосування безпілотників фактично неможливе.

Власне, крім всенаправлених, існують спрямовані антени. Вони фокусують потужність сигналу в одному напрямку, і таким чином цей сигнал проходить набагато далі. Існує досить багато типів спрямованих антен - патчі, ягі, хелікси - ми не будемо вдаватись в деталі які можна загулити, але всі ці антени об'єднує кілька характеристик, основні з яких - це коефіцієнт підсилення та діаграма спрямованості - простими словами - це певна область на карті, в межах якої дрон може літати без втрати сигналу. Як правило, чим більший коефіцієнти підсилення, тим вужча і довша діаграма спрямованості. Умовно, якщо при коефіцієнті підсилення 6дБ зона покриття буде нагадувати приплюснуте коло, то при коефіцієнті 20дБ ця зона буде схожа на огірок. Таким чином, чим краще антена підсилює сигнал, тим вужча полоса, в якій дрон буде приймати сигнали керування. Переважна більшість втрат БПЛА на фронті - це виліт апарату за межі ширини діаграми спрямованості в зоні, де відсутній сигнал керування. Що з цим робити? - потрібно знаходити баланс між підсиленням (дальністю сигналу) і шириною зони покриття, ну або просто повертати антену в правильний бік, але насправді це дуже не просто.

Вищенаведене стосується як управляючого, так і відеосигналу, відрізняються лише типи і розміри антен. Можна зробити вузьку і довгу полосу сигналу, а можете підняти антену вище - вирішення проблеми залежить від конкретних задач, наявності відповідного обладнання, правильного планування маршруту і майстерності пілота в комплексі.

Протидія РЕБ. На практиці радіоелектронна боротьба - це штука, яка сильно залежить від наявної компонентної бази. РЕБи тактичного рівня не дозволять літати ні супротивнику, ні своїм, тому вони не працюють безперервно, завжди можна знайти вікно. Портативні окопні РЕБи (ті ж самі антидронові рушниці) сильно залежать від джерел живлення.

Взагалі ми не є спеціалісти з радіоелектронної боротьби, і навряд чи можемо претендувати на експертну думку, але практика свідчить про те, що часто допомагає перехід на нестандартні частоти керування (саме їх глушать засобами РЕБу). Також на практиці для маскуванню дрону використовується передача відео на менших потужностях відеопередавача VTX, якщо немає втрати сигналу (саме відеочастоти скануються для раннього виявлення ФПВ). Супротивник завжди буде намагатись заглушити наші безпілотники за допомогою нових методів, а ми завжди будемо винаходити нові способи обійти РЕБ, цей процес безперервний.

## 2.2 Оптиковолоконні дрони

Дрони з використанням оптиволокна - це спеціалізований клас безпілотників, які отримують зв'язок, енергію або навіть керування не по радіоканалу, а через тонкий оптиковолоконний кабель, що фізично з'єднує дрон із наземною станцією. Такий дрон, по суті, не є повністю автономним літальним апаратом - він прив'язаний до землі кабелем, але саме це відкриває для нього унікальні можливості, недоступні звичайним FPV або військовим безпілотникам.

Основна ідея таких систем полягає в тому, що дрон по оптиковолоконній лінії отримує високошвидкісний двосторонній канал зв'язку з мінімальною затримкою. Це дозволяє не тільки керувати дроном на великій відстані без втрати сигналу, а й

передавати відео у форматі високої чіткості або навіть необроблені дані з камер і сенсорів - у реальному часі. У військовій або спецслужбовій сфері це дає величезну перевагу в розвідці, спостереженні або точному цілевказуванні.

Ще одна особливість деяких систем - можливість живлення дрона по кабелю, хоча це не завжди саме оптоволокно. Часто оптоволоконний дрон має комбінований кабель, в якому поєднані силові мідні жили для живлення (або подовженого польоту) і власне волоконно-оптична частина для передачі даних. Такий дрон може зависати в повітрі кілька годин або навіть діб, виконуючи завдання спостереження, ретрансляції сигналу або контролю за об'єктами.

На практиці це означає, що дрон не залежить від акумулятора, не потребує постійної заміни батарей, і може забезпечувати безперервне відеоспостереження чи зв'язок у важливих точках - наприклад, на кордоні, у зоні бойових дій або на масових заходах. Також оптоволоконний канал повністю захищений від радіоелектронної боротьби, його неможливо "заглушити" або перехопити, як це часто трапляється з FPV-дронами. Це робить його надзвичайно стійким у конфліктних умовах.

З технічного боку, дрони на оптоволоконному зв'язку мають спеціальні котушки кабелю, які автоматично розмотуються при підйомі дрона. На корпусі дрона стоїть барабан або напрямний механізм, який слідкує за натягом і зберігає стабільність під час польоту. Часто такий дрон працює у режимі зависання - він не літає активно, а утримується над визначеною точкою на висоті до 100-150 метрів. Самі дрони переважно багатовинтові - квадро- або гексакоптери, здатні утримувати стабільне положення тривалий час.

Такі системи використовуються і у цивільному секторі - наприклад, для тимчасового розгортання мереж зв'язку у надзвичайних ситуаціях, аварійного моніторингу або наукових досліджень. Проте через свою обмежену мобільність і високу вартість вони залишаються нішевіми.

Загалом, оптоволоконний дрон - це не альтернатива класичному FPV-дрону, а зовсім інший інструмент. Він не призначений для швидкого маневреного польоту, перегонів чи бойових ударів. Натомість його перевага - в стабільності, надійності,

захищеності і безперервній роботі в умовах, де радіозв'язок ненадійний або небажаний. Такий підхід - це симбіоз дронівих технологій з фіксованим каналом зв'язку, який відкриває нові горизонти в стратегії та безпеці.

### 2.3 Смуга частот, які використовують у FPV-дронах

Смуги частот, які використовуються у FPV-дронах, охоплюють кілька ключових діапазонів, кожен з яких відповідає за конкретний тип зв'язку між дроном і пілотом. Деякі частоти призначені винятково для передавання відео з камери дрона в режимі реального часу, інші забезпечують стабільне та точне радіокерування, ще інші - передають телеметричні дані, такі як висота, швидкість, заряд акумулятора або GPS-координати. Завдяки розділенню функцій між різними частотами система працює надійно, і всі необхідні сигнали передаються одночасно без конфліктів.

Усі ці частоти входять до так званого ISM-діапазону - індустріального, наукового і медичного призначення. Це міжнародно узгоджені смуги, які відкриті для бездротового використання без обов'язкового отримання ліцензії. Вони спеціально зарезервовані для цивільного, аматорського або побутового застосування - наприклад, для Wi-Fi, Bluetooth, радіозв'язку або, як у випадку FPV, для керування дронами й передавання відео. Проте, незважаючи на безліцензійний статус, у різних країнах діють певні регуляторні обмеження - наприклад, щодо максимально допустимої потужності передавача або ширини каналу. Тому пілотам важливо враховувати місцеве законодавство, особливо при використанні потужного обладнання або польотах на великі відстані.

#### 2.3.1 Частота 5.8 ГГц

Частота 5.8 ГГц - це головна робоча частота для аналогової передачі відео у світі FPV-дронів. Саме через неї традиційно передається зображення з камери дрона на FPV-окуляри або наземний приймач у режимі майже реального часу. Цей

діапазон став стандартом для відеопередачі завдяки своїй широкій доступності, швидкій реакції та простоті налаштування.

У технічному плані 5.8 ГГц - це високочастотний радіодіапазон, який має досить коротку довжину хвилі. Це дає змогу використовувати дуже компактні антени як на дроні, так і на приймальній стороні. Саме завдяки цьому дрони, особливо мікро- і гоночні, стали такими легкими і зручними у використанні - велика антена просто не потрібна. Водночас ця коротка хвиля має і слабкі сторони. Сигнал на 5.8 ГГц дуже чутливий до перешкод і майже не проходить крізь об'єкти: дерева, стіни, щільні кущі або навіть людське тіло можуть частково або повністю заглушити відео. Через це польоти на цій частоті найкраще проводити у відкритому просторі, де між пілотом і дроном є пряма видимість.

Ще одна особливість 5.8 ГГц - це її дальність. Попри те, що вона дозволяє передавати зображення з дуже малою затримкою (менше ніж 30 мс в аналогових системах), діапазон дії сигналу обмежений. Зазвичай на стандартній потужності відеопередавача (200-600 мВт) можна отримати стабільну картинку на відстані до одного-двох кілометрів у відкритому полі. Звісно, потужність передавача можна збільшити до 800 або навіть 1000 мВт, але це призведе до вищого енергоспоживання, нагрівання обладнання і потребує хорошого охолодження.

У більшості країн, включаючи Україну, використання 5.8 ГГц дозволене без ліцензії, але з обмеженнями щодо потужності. Це робить частоту зручною для аматорського застосування. Зазвичай FPV-системи використовують піддіапазон із кількома десятками відеоканалів - це дає змогу літати одночасно кільком пілотам, не створюючи завад одне одному. У той же час, через масове використання цієї частоти для Wi-Fi роутерів, відеонагляду та інших пристроїв, у місті сигнал може бути зашумлений, особливо у багатоповерхових районах.

5.8 ГГц добре працює з аналоговими системами типу TBS Unify, АКК, Foxeer, RushFPV або iFlight, а також з аналоговими приймачами в окулярах - такими як RapidFire, True-D, Realacc або аналогічними. Підключення доволі просте: відеопередавач отримує сигнал від камери і транслює його в ефір, а

приймач, вмонтований в окуляри чи зовнішню станцію, приймає цей сигнал і відображає його на екрані в режимі реального часу.

Цифрові системи, хоч і здебільшого працюють на 2.4 або 5.1 ГГц (як-от DJI), іноді також використовують 5.8 ГГц або його частину. Наприклад, системи Walksnail Avatar можуть автоматично перемикатись у залежності від частотної ситуації. Проте повноцінна цифрова передача HD-відео на 5.8 ГГц вимагає ретельнішого налаштування каналів, оскільки цифровий сигнал займає ширший спектр і потенційно може "затерти" сусідні частоти.

Незважаючи на появу цифрових FPV-рішень, 5.8 ГГц залишається актуальною для аналогових систем через свою простоту, дешевизну, малі розміри обладнання і низьку затримку. Для пілотів, які цінують швидкість реакції, змагальні польоти, freestyle або просто хочуть літати з мінімальними затратами - це досі один із найкращих варіантів.

У підсумку, частота 5.8 ГГц - це ідеальний вибір для передачі відео на коротких і середніх дистанціях, за умов прямої видимості. Вона забезпечує мінімальну затримку, зручність у використанні та компактність обладнання, хоча й вимагає уважного ставлення до перешкод і обмеженої дальності дії.

### 2.3.2 Частота 2.4 ГГц

Частота 2.4 ГГц є однією з найважливіших у світі FPV-дронів, оскільки вона водночас використовується і для управління дроном, і для цифрової передачі відео. Її популярність зумовлена тим, що це безліцензійна смуга, відкрита для цивільного використання в більшості країн світу, зокрема й в Україні. Вона входить до так званого ISM-діапазону - індустріального, наукового та медичного призначення - і тому активно використовується не лише в дронах, а й у Wi-Fi, Bluetooth, бездротових телефонах і багатьох інших технологіях.

У сфері радіокерування дронів частота 2.4 ГГц стала стандартом ще з 2000-х років. Завдяки своїй високій пропускній здатності вона дозволяє швидко передавати сигнали керування з дуже низькою затримкою. Це забезпечує миттєву

реакцію дрона на дії пілота, що критично важливо для FPV-польотів, де кожна мілісекунда має значення. Сучасні системи на цій частоті, зокрема ExpressLRS чи FrSky ACCESS, підтримують так зване frequency hopping - тобто постійне перемикання між кількома підчастотами в межах 2.4 ГГц, щоб уникнути завад і втрати сигналу. Це дозволяє зробити зв'язок більш стабільним навіть у переповненому радіоефірі, наприклад у місті чи на змаганнях, де працює багато дронів одночасно.

Разом із тим, 2.4 ГГц має певні фізичні обмеження. Оскільки довжина хвилі цієї частоти коротша, ніж у діапазонів нижче 1 ГГц, сигнал гірше проходить крізь стіни, дерева або інші перешкоди. Тому для польотів у лісі, між будівлями або на великі відстані ця частота поступається 868 або 915 МГц, які забезпечують кращу проникність. Однак для звичайного польоту в межах прямої видимості 2.4 ГГц залишається надзвичайно надійною та ефективною.

Ще один важливий аспект - використання цієї частоти для цифрової передачі відео. Компанія DJI першою вивела на ринок HD-систему передачі FPV-відео, яка працює саме в діапазоні 2.4 ГГц. Сьогодні DJI O3, O3 Air Unit і раніше - Air Unit Vista - усі працюють саме в цьому діапазоні. Ці системи дозволяють передавати високоякісне зображення з камери дрона в роздільності до 1080p з дуже низькою затримкою. Цифрова передача дозволяє побачити чітку картинку, без шуму і перешкод, як у аналогових системах. Але є важливий момент - оскільки і відео, і система управління можуть працювати на одній частоті, виникає ризик конфлікту сигналів. Щоб уникнути цього, деякі пілоти або використовують інші частоти для управління (наприклад, 868/915 МГц), або налаштовують обладнання так, щоб відео і керування використовували різні канали в межах діапазону.

Попри ці нюанси, частота 2.4 ГГц є універсальною, зручною і технічно досконалою для більшості сценаріїв польоту. Вона забезпечує чудовий баланс між швидкістю, стабільністю і якістю сигналу. Це один із небагатьох діапазонів, який дозволяє одночасно керувати дроном і бачити зображення в режимі реального часу без відчутної затримки. Саме тому 2.4 ГГц - це той стандарт, на якому базується

більшість сучасних систем FPV, особливо для пілотів, які цінують простоту, якість відео і стабільність з'єднання.

### 2.3.3 Частота 1.2 ГГц

Частота 1.2 ГГц (або точніше 1.2-1.3 ГГц) - це один із найстаріших і менш поширених діапазонів, який використовували для передачі FPV-відео, переважно в системах далекого радіусу дії. Хоча сьогодні її застосовують рідко, вона все ще зберігає певну нішу серед пілотів, які спеціалізуються на long-range польотах і потребують максимальної проникності сигналу.

Одна з головних переваг частоти 1.2 ГГц - її здатність добре проходити крізь фізичні перешкоди. У порівнянні з 5.8 чи 2.4 ГГц, сигнал на 1.2 ГГц менш схильний до поглинання деревами, стінами, пагорбами або іншими об'єктами. Це робить її привабливою для польотів у горах, лісах, або в умовах, де збереження стабільного відеозв'язку важливіше за високу якість зображення. Завдяки довшій довжині хвилі цей діапазон також забезпечує велику дальність - з відповідними антенами можна досягати десятків кілометрів у сприятливих умовах.

Втім, є й чимало недоліків. Найперше - це великі габарити і вага антен. Щоб ефективно передавати і приймати сигнал на 1.2 ГГц, потрібні довші антени, що не завжди зручно, особливо на маленьких або легких дронах. Крім того, обладнання для цього діапазону менш розвинене, менш стандартизоване і зазвичай дорожче, ніж для 5.8 або 2.4 ГГц. Це ускладнює інтеграцію та обслуговування системи, особливо для початківців.

Також варто враховувати обмеження законодавства. У багатьох країнах, зокрема в Європі, частоти в діапазоні 1.2-1.3 ГГц використовуються для авіаційного зв'язку або інших критичних служб, і тому їх цивільне використання заборонене або суворо регулюється. У США деякі піддіапазони відкриті для використання з певними обмеженнями, але й там це часто вимагає спеціальних умов - наприклад, обов'язкове використання відеопередавачів із фільтрами або ретельна перевірка потужності сигналу.

З точки зору якості зображення, аналогове відео на 1.2 ГГц не відрізняється від того, що можна отримати на 5.8 або 2.4 ГГц - формат сигналу залишається тим самим. Але завдяки кращій проникності та меншій кількості завад в ефірі, картинка часто виявляється стабільнішою на великих відстанях або в складному рельєфі. З іншого боку, цей діапазон має більшу затримку, ніж цифрові системи, і не підходить для польотів, де потрібна швидка реакція, наприклад, для фристайлу або перегонів.

Сьогодні частоту 1.2 ГГц використовують переважно досвідчені long-range пілоти, які будують кастомні платформи для експедиційних польотів або тестів на великі дистанції. У масовому FPV-літання вона майже зникла з ужитку, поступившись сучаснішим і зручнішим рішенням на 5.8, 2.4 і 900 МГц. Але як технологія з вузькою спеціалізацією - для польотів "туди, де інші не долітають" - вона все ще має свою нішу.

#### 2.3.4 Частота 915 МГц

У FPV-дронах частота 915 МГц використовується для забезпечення стабільного зворотного зв'язку між пілотом і дроном. Йдеться не про відеосигнал - для цього майже завжди застосовують 5.8 ГГц, - а про управління дроном і передачу телеметрії. Телеметрія включає такі дані, як координати GPS, висота, швидкість, напруга акумулятора, які надходять у реальному часі на наземну станцію або пульт керування.

915 МГц - це частина так званого ISM-діапазону, що дозволений до використання без спеціальної ліцензії в більшості країн Північної Америки. Саме тому в США та Канаді цю частоту широко використовують для систем керування, орієнтованих на дальність. Одна з переваг цієї частоти - її довша довжина хвилі, яка дозволяє сигналу краще проникати крізь перешкоди, наприклад, через дерева або будівлі, і долати більші відстані з меншою втратою потужності. Це робить її ідеальною для польотів на великі дистанції, так званих long-range FPV.

Типовими прикладами систем, що працюють на 915 МГц, є TBS Crossfire та ExpressLRS. Перша система стала практично стандартом для далеких польотів завдяки своїй надійності та підтримці адаптивної модуляції, яка дозволяє оптимізувати зв'язок залежно від умов польоту. ExpressLRS - новіша система з відкритим кодом, яка теж пропонує великий діапазон можливостей, зокрема надзвичайно низьку затримку сигналу.

Проте 915 МГц - це не універсальна частота. У багатьох країнах Європи, зокрема в Україні, вона може бути обмеженою або взагалі не дозволеною для використання без ліцензії. Замість неї в ЄС зазвичай використовують 868 МГц - це найближчий аналог у дозволеному діапазоні, і більшість сучасних систем мають версії під обидві частоти. Наприклад, ExpressLRS має модулі і приймачі як під 868, так і під 915 МГц.

Важливий нюанс у використанні таких систем - правильна антена. Через особливості частотної хвилі, антена має бути налаштована точно під обрану частоту. Навіть невелике відхилення може суттєво знизити ефективність зв'язку.

На завершення, хоча 915 МГц не використовується для відео, вона часто поєднується з аналоговим відео на 5.8 ГГц або цифровими системами на 2.4 ГГц (як-от DJI O3), дозволяючи ефективно розділяти канали для відео і керування, що зменшує ризик завад і підвищує стабільність польоту

### 2.3.5 Частота 433 МГц

Частота 433 МГц - це один із найнижчих радіодіапазонів, які використовувалися у FPV-сфері, переважно для радіокерування дроном та телеметрії. Вона належить до безліцензійного ISM-діапазону і, як і частоти 868/915 МГц, відзначається відмінною дальністю зв'язку та здатністю проникати крізь перешкоди. Проте сьогодні її використовують дуже рідко, і вона майже повністю витіснена новішими та швидшими системами на інших частотах.

Сигнал на 433 МГц має довгу хвилю, а отже - добре проникає крізь дерева, будівлі та нерівності рельєфу. У поєднанні з відповідними антенами та

протоколами управління, ця частота дозволяла досягати вражаючих дистанцій - іноді понад 50 км у відкритому просторі. Саме тому її обирали пілоти, які займалися long-range польотами або експедиційними місіями в горах, пустелях і подібних локаціях.

Найбільш відомими системами на 433 МГц були модулі типу OpenLRS, DragonLink, EzUHF, а також ранні версії телеметричних модемів для ArduPilot чи Pixhawk. Ці рішення підтримували стійкий зв'язок на малих швидкостях передачі даних, але мали вищу затримку і нижчу пропускну здатність, що унеможлиблювало використання їх у FPV-перегонах або фристайлі. 433 МГц добре підходив для передачі команд на автопілот або базову телеметрію: висота, GPS, швидкість, напруга акумулятора.

Попри переваги в дальності, цей діапазон має суттєві недоліки. Найперше - він часто перетинається з частотами, які використовуються для радіоаматорського зв'язку, метеообладнання, або навіть сигналізацій та пейджерів. У багатьох країнах, зокрема в Європі, використання 433 МГц для управління дроном або передачі даних заборонене або обмежене. У деяких регіонах ця частота зарезервована для іншого призначення, і FPV-обладнання може створювати конфлікти із важливими службами.

Крім того, на фоні розвитку сучасних систем як-от ExpressLRS, TBS Crossfire чи Tracer, 433 МГц морально застарів. Ці нові протоколи, що працюють на частотах 868/915 МГц, забезпечують набагато вищу швидкість, стабільність, адаптивний hopping, телеметрію у реальному часі та просте налаштування. Тому навіть серед пілотів, які спеціалізуються на польотах на великі дистанції, 433 МГц майже зник.

Сьогодні цей діапазон можна зустріти хіба що у старих або специфічних проектах, де неважлива швидкість і затримка, але критично важлива стабільність на великих відстанях. У масовому FPV-літання 433 МГц уже не застосовується, поступившись більш сучасним, гнучким і легкодоступним технологіям.

У підсумку, вибір частоти для FPV-дронів залежить від цілей польоту. Для коротких і швидких польотів у межах прямої видимості зручніше використовувати 5.8 ГГц для відео та 2.4 ГГц для керування. Для польотів на відстань або в складних

умовах краще перейти на нижчі частоти, як-от 868 чи 915 МГц. У будь-якому випадку потрібно враховувати законодавчі обмеження в конкретній країні, оскільки не всі частоти є легальними до вільного використання без ліцензії.

## 2.4 Протокол зв'язку ELRS.

ELRS (ExpressLRS) - це сучасний протокол зв'язку для керування дронами та іншими радіокерованими моделями. Він став дуже популярним серед ентузіастів FPV дронів завдяки своїй надійності, низькій затримці та великій дальності.

ELRS - це відкритий протокол зв'язку, розроблений для передачі команд від RC-передавача до приймача на дроні. Він використовує радіочастотні модулі (2.4 ГГц або 900 МГц) і забезпечує стабільний зв'язок на великих відстанях з мінімальною затримкою. Приймач RX зображено на рисунку 2.4.

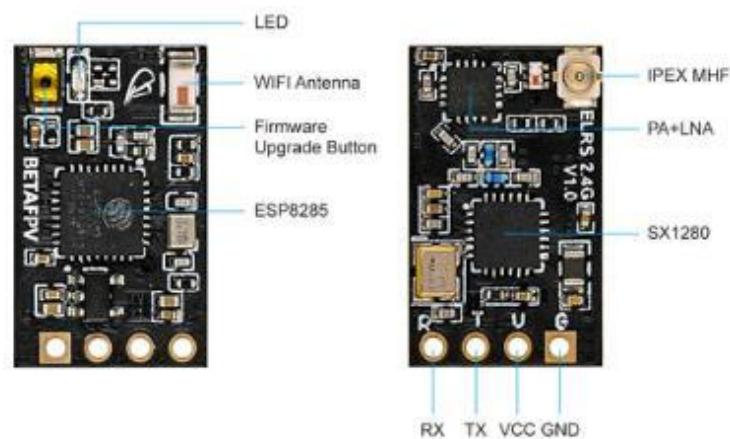


Рисунок 2.4 - Приймач BetaFpv ELRS Nano Receiver 2.4 GHz [36]

Високопродуктивний канал радіоуправління з відкритим кодом ExpressLRS має на меті забезпечити найкращу повністю відкриту радіолінію керування високою частотою оновлення, зберігаючи при цьому максимально досяжний радіус дії з низькою затримкою. Широка підтримка апаратного забезпечення на частотах 900 МГц і 2,4 ГГц.

ExpressLRS - це система дистанційного керування великої дальності з відкритим кодом, яка зосереджена на радіусі дії та затримці, розроблена у 2021 році. Вона також є набагато економічнішою порівняно з TBS Crossfire і Tracer. Якщо потрібен доступний, але високопродуктивний і надійний радіозв'язок із гідним радіусом дії, перегляньте нашу статтю ExpressLRS. Приймач TX зображено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 - Передавач ELRS Micro TX Module [37]

Великий радіус дії - тести показали, що можна отримати десятки кілометрів радіусу дії лише за 100 мВт, використовуючи ELRS, для більшості звичайних користувачів це просто означає, що майже ніколи не будуть безпечні за звичайних умов. ExpressLRS базується на апаратному забезпеченні SX127x у поєднанні з MCU ESP8285, ESP32 або STM32 для RX і TX відповідно. Він використовує модуляцію LoRa на всіх швидкостях передачі пакетів, яка також використовується в ImmersionRC Ghost і TBS Crossfire, тому він має помітно кращий радіус дії, ніж системи, які не використовують LoRa, наприклад TBS Tracer. Зверніть увагу, що Crossfire використовує LoRa лише в 50 Гц, коли перемикається на 150 Гц, він використовує FSK і не пропонує такого ж широкого діапазону LoRa.

Система працює на частотах 2,4 ГГц і 900 МГц, і найбільша відстань, яку ми бачили, - це 40 км, використовуючи частоту 900 МГц і лише 10 мВт, оскільки

демонструється на сторінці таблицю відстаней, значення якої наведено у таблиці 2.1, яких тестувальники досягли з іншими налаштуваннями.

Таблиця 2.1 - Відстані і залежності від потужності

<b>Макс. відст.</b>	<b>частота</b>	<b>Pkt Rate</b>	<b>Потужність передачі</b>	<b>Відмовостійкість на максимальному діапазоні</b>	<b>Пілотна ручка</b>
40 км	900M	50 Гц	10 мВт	Немає	Снайпси
35 км	2.4G	250 Гц	100 мВт	Немає	Снайпси
20 км	2.4G	150 Гц	100 мВт	Так	Пайран
10 км	2.4G	500 Гц	10 мВт	Так	mrscythe
10 км	2.4G	250 Гц	100 мВт	Немає	Снайпси
6 км	900M	100 Гц	50 мВт	Немає	Снайпси
6 км	2.4G	500 Гц	250 мВт	Немає	спец
4,7 км	900M	200 Гц	250 мВт	Немає	DaBit
3 км	2.4G (мікросхема антени RX)	500 Гц	100 мВт	Немає	спец
2,28 км	900M	50 Гц	10 мВт	Немає	Майк Малаголі

Відкритий вихідний код - він розробляється активною спільнотою та регулярно оновлюється. Різні постачальники можуть виготовляти апаратне забезпечення для нього, що означає більше можливостей і доступність модулів приймача та передавача, подібних до польотних контролерів Betaflight.

Програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом є безкоштовним, тому вартість пов'язана лише з апаратним забезпеченням. А конкуренція між виробниками знижує ціни, що чудово для споживачів.

## 2.5 Протокол зв'язку TBS CrossFire

TBS Crossfire - це сучасний протокол зв'язку для керування FPV-дронами, розроблений компанією Team BlackSheep (TBS). Він працює в діапазоні 868 MHz (Європа) або 915 MHz (США) і забезпечує довготривалий та надійний зв'язок навіть у складних умовах.



Рисунок 2.6 - Приймач TBS Crossfire Diversity Nano Rx [38]



Рисунок 2.7 - Передавач TBS Crossfire TX [39]

Crossfire Micro TX запозичив основну технологію у свого старшого брата, але являє собою J1-модуль, спрощений до найбільш затребуваних функцій.

Для людей, які хочуть здійснювати наддалекі польоти за межами 15-20 км, Crossfire Micro TX - кращий вибір. Для тих, хто хоче проникати в будівлі, літати на

міні-квадрокоптерах або просто досліджувати околиці на відстані декількох кілометрів, Micro TX буде ідеальним компаньйоном.

TBS Crossfire Micro TX має вбудовану телеметрію. Завдяки двосторонньому зв'язку є можливість оновлення прошивки, налаштування каналу відеопередавача або налаштування параметрів управління польотом, таких як PIDs.

Адаптивна смуга пропускання контролює швидкість передачі або оптимізує її для максимального діапазону.

CRSF - це власний протокол зв'язку TBS між Crossfire та пультом / польотним контролером (FC). Він забезпечує наднизьку затримку і неймовірну пропускну здатність (в 3 рази швидше, в 6 разів більше даних, ніж у будь-якого порівнянного протоколу). Завдяки такій тісній інтеграції TBS Crossfire є логічним вибором для тих, хто літає на платформах Betaflight, KiSS або ArduPilot/Pixhawk.

Далекобійна, адаптивна і надійна система дистанційного керування, несприйнятливості до бортового шуму, двостороння лінія зв'язку з життєво важливими даними і телеметрією в реальному часі, самовідновлення і стрибкоподібна перебудова частоти (DSSS, FHSS), адаптивне управління смугою пропускання і оптимізація діапазону, супер проста прив'язка і настройка за допомогою вбудованого дисплея пульта управління, низька затримка, частота оновлення 150 Гц (в 3 рази швидше, ніж звичайні радіолінки), дві моделі приймача: 8-портовий Diversity Rx, 4-портовий міні-приймач (Вага 4 г), вихід 8 або 12 каналів через SBUS / PPM / CRSF на обох приймачах, можливість літати з кількома друзями одночасно (10 і більше), обирає потужність від 25 мВт до 250 мВт (застосовуються місцеві обмеження), світлодіод передавача показує стан зв'язку, мікро-приймач для невеликих дронів, бездротове оновлення прошивки, всі налаштування змінюються за допомогою lua скриптів

Поліпшення і зміни у версії V2. TBS Crossfire Micro TX V2 має нову мікросхему підсилювача Skyworks RF, здатну працювати на 27 дБм (500 мВт), тому є можливість збільшити максимальну потужність з 250 мВт до 500 мВт при оновленні прошивки. Тепер антена не від'єднується. Це відповідає правилам FCC (антена не повинна бути знімною в пристрої). Однак «інтегрована антена» - це

просто ковпачок над роз'ємом SMA. Якщо відкрутити гвинти і зняти пластиковий ковпачок, то можна використовувати будь-яку потрібну антену.

## 2.6 Кастомні антени для різних частот

Для телеметрії у FPV-дронх використовують антени діпольного типу. Діпольні антени - це один з найпростіших і найпоширеніших типів антен, що використовуються для випромінювання та прийому електромагнітних хвиль. Вони складаються з двох провідних елементів, розташованих в напрямку, перпендикулярному до хвилі. Ці антени широко застосовуються в радіозв'язку, телебаченні та бездротових технологіях.

Принцип роботи діпольної антени базується на зміні електричного струму на її терміналах у коливальний процес. Ці коливання створюють електричне поле, яке поширюється в навколишньому просторі як електромагнітна хвиля. Діпольна антена зазвичай має два однакових провідники, довжина яких дорівнює половині довжини хвилі ( $\lambda/2$ ). Це забезпечує ефективне випромінювання або прийом сигналу на певній частоті.

Геометрично діпольна антена складається з двох провідних елементів, розташованих на половину довжини хвилі. Є й варіанти збірних діпольних антен, що включають кілька таких елементів для підвищення ефективності випромінювання чи чутливості. Основна характеристика діпольної антени - це її направленість: вона має косинусоподібний патерн випромінювання, де максимальна потужність випромінюється перпендикулярно до осі антени.

Імпеданс стандартної діпольної антени складає близько 73 Ом, що важливо для сумісності з іншими компонентами радіоапаратури, такими як передавачі та приймачі. Також діпольні антени мають лінійну поляризацію, тобто електричне поле випромінюється вздовж певної осі - горизонтальної або вертикальної.

Діпольні антени широко використовуються в радіозв'язку, включаючи аматорські та професійні радіосистеми, а також у старих телевізійних системах для прийому сигналів. Вони також знайшли застосування в астрономії для прийому

радіохвиль і в інших наукових дослідженнях. В бездротових мережах діпольні антени використовуються для створення з'єднань між точками доступу.

Серед переваг діпольних антен - їхня простота конструкції та здатність працювати в широкому діапазоні частот. Вони універсальні і підходять для більшості радіо та телекомунікаційних систем. Однак діпольні антени мають обмежену напрямленість, оскільки сигнал випромінюється в основному в одному напрямку. Крім того, для низьких частот діпольні антени можуть бути великими за розміром, що ускладнює їх установку.

Виготовлення кастомних антен типу діполь для FPV-дронів - важливий елемент для покращення зв'язку та дальності польоту, особливо в умовах РЕБ чи складного середовища. Діполь - одна з найпростіших і найефективніших антен, яку можна виготовити вручну, точно налаштувати під конкретну частоту, і отримати стабільний результат без дорогого обладнання.

Основна ідея діполя полягає в тому, що він складається з двох рівних плечей провідника, рознесених у протилежні боки від точки живлення. Довжина кожного плеча має становити чверть хвилі сигналу. Наприклад, для частоти 2.4 ГГц повна довжина хвилі - приблизно 125 мм, отже одне плече - 31-32 мм. Для 5.8 ГГц довжина хвилі - близько 51-52 мм, тож плече - 12.5-13 мм. Точність важлива, але навіть  $\pm 0.5$  мм похибки дають працездатний результат.

Щоб зробити діполь, найчастіше використовують тонкий коаксіальний кабель (RG316 або аналогічний). Спочатку акуратно знімають ізоляцію і частину екрану, залишаючи центральну жилу - це буде активне плече. Далі розділяють плетений екран на протилежну сторону - це друге плече. Обидва плеча розгинають на 180 градусів одне до одного, утворюючи T-подібну або V-подібну форму (залежно від завдання). Після цього антена ретельно вимірюється, підрізається до потрібної довжини, а точка живлення зачищається для пайки. Залежності довжини антени зображені на рисунку 2.8.

Як за розміром антени на FPV приблизно дізнатися частоту керування

Частота, МГц	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
Довжина L, мм	185	365	290	235	200	175	152	140	125	117	108	100	93

Частота, МГц	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400
Довжина L, мм	87	84	74	70	68	66	65	62	60	57	55	53	51

Частота, МГц	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050
Довжина L, мм	49	48	46	45	43	42	41	40	39	38	37	36	35

Частота, МГц	2100	2150	2200	2250	2300	2350	2400	2450	2500	2550	2600	2650	2700
Довжина L, мм	34	33	32	32	31	30	30	29	29	28	27	27	26

Увага! Антени різних виробників можуть трохи відрізнятися за довжиною



Порахував для ЗСУ Сергій Флеш

Рисунок 2.8 - Залежність довжини діполя і частоти. [19]

У діполі немає потреби у заземленні чи складному узгодженні, бо він сам по собі є симетричною конструкцією. Але важливо, щоб не було електричного контакту між центральною жилою та екраном, і щоб екран не замикався на корпус дрона. Часто антену зміцнюють термоусадкою або м'яким силіконовим корпусом, щоб вона не гнулася під час польоту. Плечі можна трохи відхиляти від осі, створюючи V-подібну форму - це збільшує охоплення сигналу і робить антену менш чутливою до напрямку.

Для кращої роботи важливо не лише виготовити антену правильно, а й правильно її встановити. Діполь має найбільше випромінювання у перпендикулярному напрямку до осі, тобто сигнал найкраще ловиться «в боки», а не «вздвж». Тому його розташування має враховувати орієнтацію дрона під час польоту - вертикальне або горизонтальне, залежно від того, де перебуває оператор.

Кастомні діполі показують відмінні результати при використанні на частотах 433 МГц, 868/915 МГц, 1.2, 2.4 та навіть 5.8 ГГц. Головне - точно дотриматися

довжини плеча, уникати зайвих скруток і тримати пайки акуратними. За бажанням можна зробити антену з віддзеркаленням на фольгованій пластині або з рознесенням плечей під кутом - це дає трохи додаткового виграшу в сигналі. Простота діполя робить його незамінним у польових умовах - його легко зробити з підручних матеріалів і оперативно замінити.

## 2.7 Методи боротьби із завадами

Боротьба з радіоелектронним придушенням у сфері FPV-дронів - це складна й багатокомпонентна задача, яка потребує поєднання технічних рішень, програмної логіки та правильної тактики. FPV-дрони у воєнному середовищі постійно піддаються загрози втрати керування через ворожі засоби РЕБ, які глушать основні частоти - зазвичай це 2.4 ГГц для керування і 5.8 ГГц для відео. Щоб протидіяти цьому, інженери і оператори FPV-дронів вдаються до ряду заходів.

Одним із ключових підходів є використання альтернативних частот. Замість популярних і добре приглушуваних 2.4 і 5.8 ГГц, дрони можуть працювати на менш розповсюджених діапазонах - зокрема, 433 МГц, 868/915 МГц або 1.2 ГГц. Такі частоти мають кращу проникність крізь перешкоди й менше піддаються точковому глушінню. Це особливо важливо при польотах на великі відстані або в умовах складної радіообстановки.

Додаткову надійність забезпечують дві незалежні системи зв'язку, встановлені на одному дроні. Це можуть бути два радіомодулі, що працюють на різних частотах і передають однакові або розділені типи інформації. Наприклад, один канал використовується для прямого керування, а інший - для резервного або для телеметрії. При втраті одного сигналу дрон автоматично або за командою переходить на другий. Такий підхід підвищує шанси зберегти контроль над дроном у критичній ситуації.

Ще одним потужним інструментом є технологія перестрибування частот (frequency hopping), коли сигнал постійно змінює частоту відповідно до певного алгоритму. Це ускладнює завдання для засобів РЕБ, адже їм необхідно глушити

одразу весь частотний спектр або встигати слідкувати за перестрибуванням, що практично неможливо в реальному часі.

У цифрових системах широко застосовуються алгоритми корекції помилок. Вони дозволяють зберігати відео та керування навіть при часткових втратах пакунків даних. Наприклад, системи DJI або Walksnail використовують FEC (forward error correction), завдяки чому картинка «не сиплеться» повністю, навіть коли з'являються короткочасні завади.

Для зменшення електронної помітності застосовується так зване малопотужне мовчазне або адаптивне передавання. Дрон або працює на мінімально можливій потужності, або використовує короткі імпульсні сигнали замість постійного передавання. Це ускладнює виявлення і точне глушіння, а також дозволяє дрону «працювати в тіні».

Коли умови стають критичними, оператори можуть підсилювати сигнал за допомогою потужних передавачів і підсилювачів, особливо на відеоканалі. Разом із направленими або комбінованими антенами це дає змогу пробити навіть щільне глушіння на деяких напрямках. Антени також можуть бути фізично рознесені, що мінімізує взаємні завади і покращує прийом сигналу з різних боків.

Не менш важливим є програмне забезпечення дронів. При втраті сигналу сучасні політні контролери здатні реалізовувати автономні сценарії - наприклад, автоматичне повернення за маршрутом, завершення польоту з самознищенням, або інерційний вихід у визначену точку. Ці дії дозволяють дрону не стати даремною втратою навіть при повному глушінні.

Інженери також експериментують з оптоволоконними системами, де замість радіозв'язку використовується фізичне з'єднання через кабель, що тягнеться від дрона до оператора. Це повністю захищає від РЕБ, хоча сильно обмежує дальність і маневреність. Тим не менш, така схема дає змогу виконувати задачі в середовищах, де радіозв'язок неможливий взагалі.

Сучасні дослідження включають застосування штучного інтелекту, який аналізує спектр, визначає, де саме йде глушіння, і автоматично підлаштовує

передавач або перемикає канали. У майбутньому це може зробити дрони майже автономними у виживанні в умовах складної електронної війни.

І, нарешті, важливим є тактичний підхід - оператори навчаються летіти так, щоб уникати зони прямої дії РЕБ, використовують рельєф, будівлі та інші перешкоди, або запускають приманки, які провокують ворога активувати глушіння завчасно. Весь цей арсенал методів працює лише тоді, коли його застосовують комплексно: техніка, програмне забезпечення, досвід пілота і розуміння тактики повинні йти пліч-о-пліч, щоб FPV-дрон мав шанс виконати завдання і повернутися.

## 2.8 Подвійний радіозв'язок

Подвійні частоти - це одна з ефективних тактик боротьби з радіоелектронними перешкодами в FPV-дронах. Ідея полягає в тому, що дрон одночасно використовує два (або більше) незалежних радіочастотних канали: один для керування, інший для відео, або ж дублювання однієї функції різними частотами. Це значно підвищує живучість дрона в умовах активної РЕБ.

Найчастіше подвійні частоти застосовуються в такому форматі: наприклад, відео передається на 5.8 ГГц (аналог чи цифра), а керування йде на 2.4 ГГц або 915 МГц. Якщо один з каналів буде заглушено, другий може залишатися працездатним - що дає пілоту можливість або завершити місію, або повернути дрон назад.

У більш складних системах використовуються дублюючі канали одного типу - наприклад, два відеопередавачі: основний працює на 5.8 ГГц, а резервний - на 1.2 ГГц. Якщо головний канал піддається глушінню, дрон автоматично або вручну перемикається на резервний. Аналогічно може дублюватися і канал керування - основний працює на 2.4, а резервний - на 433 або 915 МГц.

Перевага подвійних частот у тому, що вони дозволяють розвести функціональні сигнали по різних частотах, знижуючи ризик одночасного глушіння всієї системи. Це також ускладнює роботу РЕБ, яка повинна охоплювати ширший частотний діапазон, щоб ефективно блокувати зв'язок.

У військових FPV-дронах іноді реалізується автоматичне перемикання каналів або адаптивне балансування - система сама визначає, який канал має кращу якість сигналу, і використовує його в режимі реального часу. Це робить дрон більш стійким до змін у середовищі та адаптивним до умов, що змінюються.

Ще один варіант - рознесення типів сигналу. Наприклад, відео може йти цифровим потоком на 5.8 ГГц, а резервне - у вигляді аналогової трансляції на іншій частоті. Навіть якщо цифрове відео буде повністю заглушене, пілот зможе орієнтуватися по спрощеному аналоговому сигналу.

Також іноді використовуються дві антени з окремими приймачами - на кожній з яких працює своя частота. Це дозволяє пілоту мати постійний огляд ситуації й навіть перемикатися між сигналами вручну або через автоперемикач, налаштований на рівень сигналу.

Подвійні частоти - це не панацея, але в умовах інтенсивної РЕБ вони дають додатковий шанс дрону вижити, виконати завдання або принаймні повернутися. У сучасному бойовому середовищі, де противник використовує комплексну радіоелектронну оборону, ця тактика стає дедалі більш актуальною.

Встановлення двох модулів зв'язку на одному FPV-дроні - це одна з найефективніших технік підвищення надійності зв'язку в умовах РЕБ. Такий підхід дозволяє дублювати або розділяти канали керування і телеметрії, зменшуючи ризик повної втрати контролю. Найчастіше йдеться саме про дві незалежні системи керування, які працюють на різних частотах і з різними протоколами.

Найбільш типовий сценарій: на дроні встановлюються два RC-приймачі, наприклад, один на 2.4 ГГц (наприклад, ExpressLRS або Crossfire) і другий на 915 або 433 МГц (наприклад, також ExpressLRS або старіші FrSky, OpenLRS системи). Обидва приймачі підключені до політного контролера - один як основний, інший як резервний. У деяких випадках обидва працюють одночасно, а в інших - один активується при втраті сигналу з першого.

У контролері польоту (наприклад, Betaflight, Ardupilot чи iNav) можна налаштувати автоматичне перемикання входів керування у випадку втрати одного з каналів. Це забезпечує безперервність зв'язку навіть при активному глушінні

одного з частотних діапазонів. Також іноді використовуються зовнішні керуючі мікроконтролери або скрипти, які відповідають за логіку перемикання.

Два модулі можуть працювати в різних частотних середовищах і мати різні характеристики. Наприклад, 2.4 ГГц - це швидкий канал з малою затримкою, зручний для маневреного польоту, але чутливий до завад. Натомість 915 або 433 МГц - повільніші, але набагато краще «пробивають» перешкоди і працюють на великі дистанції.

У складніших реалізаціях один з модулів може забезпечувати односпрямовану телеметрію, тоді як інший відповідає тільки за керування. Наприклад, дрон може отримувати команди від пілота по 2.4 ГГц, а передавати дані про стан польоту, координати, напругу, GPS тощо - по окремому каналу на 433 МГц, який менш схильний до глушіння.

Ще один важливий момент - антени. Щоб обидва модулі працювали ефективно, вони повинні мати рознесені антени з правильним кутом розташування. Це дозволяє уникнути взаємних завад і покращити якість прийому. У деяких випадках використовуються направлені або дипольні антени, або навіть перемикання між кількома антенами в залежності від сигналу.

У бойовому застосуванні такий підхід дозволяє FPV-дрону залишатися керованим навіть під сильним тиском РЕБ - наприклад, коли 2.4 повністю заглушено, але 433 ще дає змогу завершити місію або дати останню команду. Така система може працювати у зв'язці з GPS-автономією, щоб у випадку втрати обох каналів дрон виконав наперед задану поведінку: повернення, зависання, самознищення або інше.

Загалом, два модулі зв'язку - це не просто резерв, а елемент стратегії живучості дрона. Вони дають змогу адаптуватися до складного середовища, де йде активне придушення сигналу, і зберігати контроль або хоча б часткову функціональність до останнього моменту.

## 2.9 Висновки другого розділу

У другому розділі дипломної роботи ґрунтовно досліджено технічні та прикладні аспекти організації зв'язку для FPV-дронів, що має ключове значення для забезпечення ефективного керування та передачі відеосигналу, особливо в умовах бойових дій та радіоелектронного протистояння. Одним із центральних питань розділу стало вивчення типів антен, які використовуються у FPV-системах, зокрема спрямованих і всеспрямованих антен, а також антен з різними типами поляризації – лінійною та круговою. Пояснено, як правильна відповідність поляризації передавача і приймача дозволяє зменшити втрати сигналу, а спрямованість антени впливає на дальність та стійкість з'єднання.

Детально описано вплив частоти сигналу на його здатність долати перешкоди: наприклад, нижчі частоти (часто використовувані для керування) краще проникають крізь перешкоди та мають більший радіус дії, тоді як вищі частоти (часто застосовувані для відео) забезпечують вищу якість зображення, але чутливіші до завад. Важливим є і вибір правильної потужності передавача – збільшення потужності підвищує надійність зв'язку, але може спричинити надмірні електромагнітні випромінювання, які виявляються противником.

Окремий підпункт присвячено аналізу джерел перешкод, які можуть впливати на стабільність зв'язку. Зокрема, розглянуто такі фактори, як складний рельєф місцевості (гори, будівлі), наявність інших радіопередавачів, і активне застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), які можуть глушити або перекривати сигнали керування та відео.

У цьому контексті досліджено перспективу застосування оптоволоконних FPV-дронів, які замість радіохвиль використовують тонке волокно для передачі даних. Такі дрони практично невразливі до РЕБ, забезпечують високу якість зображення без затримок і можуть утримувати зв'язок незалежно від електромагнітної ситуації в повітрі, хоча й мають обмеження по дальності та маневреності.

Також значну увагу приділено протоколам зв'язку, які використовуються у сучасних FPV-системах. Розглянуто два найпоширеніших протоколи – ELRS (ExpressLRS) та TBS Crossfire. ELRS характеризується високою швидкістю оновлення команд (до 1000 Гц), відкритою архітектурою, можливістю адаптації параметрів під користувача та високою дальністю при низькій затримці. Crossfire, у свою чергу, відомий своєю стабільністю, перевіренистю в польових умовах, здатністю працювати в умовах слабкого сигналу завдяки телеметрії та потужному модулятору.

В умовах активного радіоелектронного протистояння розглянуто застосування подвійних каналів зв'язку (redundant systems), коли одночасно використовується основний і резервний канал. Це дозволяє зберегти контроль над дроном у разі заглушення або втрати одного з каналів. Також описано методи протидії перешкодам: частотне перестрибування (frequency hopping), адаптивна потужність передавача, використання резервних частот, автоматичне перемикання каналів та інтелектуальні антени, які змінюють напрямок випромінювання в реальному часі.

### 3 ПРОГРАМУВАННЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ ПОДВІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ FPV-ДРОНУ

#### 3.1 Загальне налаштування дрону

Процес прошивки FPV дрона починається з підключення політного контролера до комп'ютера через USB-кабель. На комп'ютері відкривають програму, зазвичай Betaflight Configurator, і підключаються до контролера. Далі переходять у вкладку "Firmware Flasher", де обирають модель політного контролера зі списку, тип прошивки та її версію. Після цього прошивка завантажується з офіційного серверу і записується у пам'ять контролера. Перед початком прошивки контролер переводять у режим DFU (Device Firmware Update), щоб він був готовий до запису. Після завершення прошивки контролер перезавантажується, і програма дозволяє зайти в нове меню налаштувань. Тут проводять початкову конфігурацію - калібрування акселерометра, налаштування приймача, портів, режимів польоту та інших параметрів, після чого дрон готовий до тестування. Алгоритм зображено на рисунку 3.1.

Розглянемо перший крок. Налаштування FPV-дрона починається з ретельної підготовки. Важливо не лише мати базове уявлення про процес, але й фізично підготувати все необхідне обладнання та переконатися в справності техніки.

Передусім потрібно підготувати робоче місце. Воно має бути чистим, добре освітленим і достатньо просторим, щоб зручно розкласти всі компоненти дрона, інструменти та комп'ютер. Наступний крок - зібрати набір інструментів, які можуть знадобитися. Зазвичай це хрестоподібні та шестигранні викрутки, ключі, пінцети, а також невеликий набір запасних гвинтів, які можуть знадобитися при розбиранні або заміні компонентів.

Комп'ютер - ще один критично важливий елемент підготовки. На ньому має бути встановлено програмне забезпечення, яке відповідає контролеру польоту дрона. Найпоширеніші варіанти - це Betaflight Configurator, Cleanflight або INAV, які можна завантажити з офіційних джерел. Встановлення повинно проходити з

урахуванням сумісності з операційною системою, а також із встановленими драйверами для з'єднання з польотним контролером.



Рисунок 3.1 - Алгоритм прошивки FPV-дрону

Крім програмного забезпечення, необхідно мати під рукою USB-кабель, який підходить до роз'єму контролера. Рекомендується використовувати якісний кабель,

оскільки неякісні або пошкоджені можуть призводити до збоїв у підключенні або навіть до обриву зв'язку під час оновлення прошивки.

Особливу увагу слід приділити живленню. Знадобляться повністю заряджені акумулятори, які відповідають характеристикам дрона. Не менш важливо переконатися, що зарядний пристрій працює коректно та має відповідні параметри для заряджання саме тих акумуляторів, які використовуються. Якщо дрон вмикається тільки при підключенні батареї, її слід під'єднати під час перевірки ESC або тестування моторів.

На завершення етапу підготовки потрібно ретельно оглянути дрон. Перевірте, чи немає пошкоджень на рамі, тріщин, відірваних проводів, неякісних або холодних паяних з'єднань. Приділіть увагу контактам акумулятора, роз'ємам живлення, контролеру польоту, відеопередавачу (VTX) та приймачу радіокерування. Якщо щось викликає підозру - краще усунути проблему до початку налаштувань. Також важливо переконатися, що пропелери зняті, адже під час роботи з програмою Betaflight можуть виникнути випадкові сигнали до ESC, які здатні увімкнути обертання моторів і створити небезпеку.

Тільки після того, як усі ці кроки виконані, можна безпечно переходити до наступного етапу - підключення дрона до комп'ютера і його програмного налаштування.

Розглянемо другий крок. Важливим етапом у підготовці до налаштування FPV-дрона є встановлення спеціального програмного забезпечення, яке дозволяє взаємодіяти з польотним контролером та змінювати всі необхідні параметри. Найпоширенішим рішенням для таких задач є програма Betaflight Configurator, яка активно підтримується спільнотою, сумісна з великою кількістю контролерів і має зрозумілий інтерфейс. Крім Betaflight, існують також інші платформи - Cleanflight і INAV - але саме Betaflight вважається найбільш універсальною для FPV-дронів.

Процес встановлення починається з завантаження програми. Щоб уникнути помилок або шкідливих файлів, програму потрібно завантажувати виключно з офіційного джерела - зазвичай це сайт GitHub або сторінка проєкту в Chrome Web Store. Завантажується архів або інсталятор відповідно до операційної системи, яку

використовуються: Windows, macOS або Linux. Після завершення завантаження відкривається інсталяційний файл, і далі користувач дотримується стандартних інструкцій на екрані, погоджуючись з умовами використання та обираючи місце для встановлення програми.

Після завершення встановлення можна переходити до підключення дрона. Для цього використовується USB-кабель, сумісний із польотним контролером. У більшості випадків це micro-USB або USB Type-C. Важливо, щоб кабель не був призначений лише для зарядки, а підтримував передачу даних. Після підключення дрона до комп'ютера операційна система має автоматично розпізнати пристрій, хоча в деяких випадках може знадобитися встановлення додаткових драйверів, зокрема CP2102 або STM32.

Далі запускається Betaflight Configurator. У головному вікні програми користувач бачить меню вибору COM-порту. Якщо все підключено правильно, у випадаючому списку з'явиться порт, до якого приєднано контролер. Потрібно вибрати цей порт і натиснути кнопку «Connect». Через кілька секунд програма з'єднається з дроном, і отримаємо доступ до всіх вкладок конфігурації.

На цьому етапі програмне забезпечення повністю готове до роботи, а квадрокоптер - до подальшого налаштування. Усі основні параметри, калібрування, прошивка ESC, налаштування режимів польоту, передавача і системи живлення тепер можна виконувати безпосередньо через Betaflight Configurator.

Розглянемо третій крок. Після того як квадрокоптер підключено до Betaflight Configurator, потрібно налаштувати основний контролер польоту. Цей етап є ключовим, оскільки на ньому задаються всі базові параметри для забезпечення стабільної роботи дрона. Перш за все, необхідно визначити тип квадрокоптера, оскільки від цього залежатиме коректна робота системи стабілізації та загальні характеристики керування.

У інтерфейсі Betaflight Configurator потрібно перейти на вкладку «Configuration», де можна задати базові параметри для дрона. Одним із перших налаштувань буде вибір типу рами. Наприклад, якщо квадрокоптер має X-подібну раму, необхідно вказати саме цей тип, адже це визначає, як правильно

працюватимуть мотори під час маневрування. Інші варіанти типів рами - це H-подібні, V-подібні або навіть фіксовані рами, і кожен з них має свої специфікації.

Далі слід налаштувати параметри моторів та регуляторів швидкості (ESC). В Betaflight доступні опції для налаштування моторів, щоб забезпечити оптимальну потужність і відповідну роботу кожного мотора в комбінації з ESC. Важливо вказати правильний тип ESC, відповідно до характеристик дрона, а також налаштувати частоту оновлення (PWM, DShot) для кращої роботи системи.

Одним із обов'язкових кроків є вибір прошивки для контролера польоту. В цьому пункті необхідно переконатися, що вибрана версія прошивки сумісна з контролером, оскільки різні моделі можуть вимагати різних версій. Після цього потрібно завантажити і прошити контролер, щоб підготувати його до роботи.

Наступним кроком є калібрування акселерометра, що дозволяє дрону правильно визначати своє положення в просторі. Для цього необхідно перейти до вкладки "Setup", де можна активувати режим калібрування акселерометра, показано на рисунку 3.2.

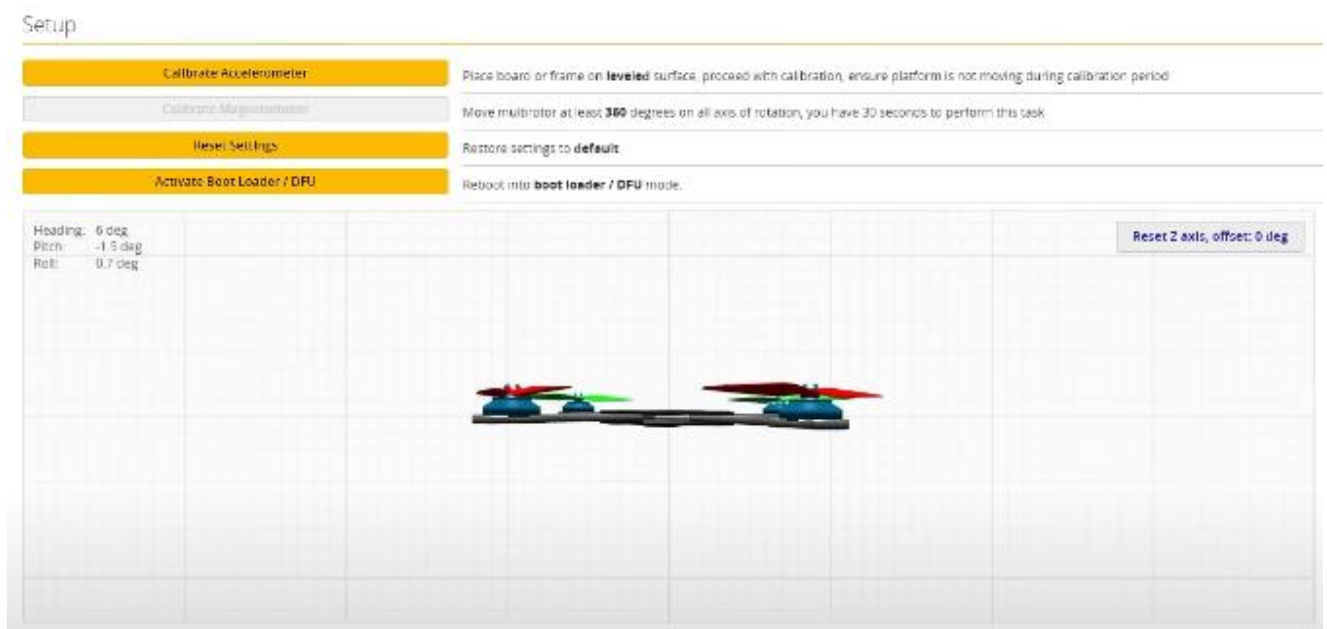


Рисунок 3.2 - Вкладка налаштування акселерометра

Перш ніж натискати кнопку "Calibrate Accelerometer", важливо поставити квадрокоптер на рівну, горизонтальну поверхню, оскільки акселерометр повинен

працювати в точному вертикальному положенні для коректного результату. Після натискання кнопки програма автоматично виконає калібрування, і цей процес займе кілька секунд. Важливо дочекатися завершення калібрування, перш ніж переходити до наступних етапів налаштування.

Розглянемо четвертий крок. налаштування FPV-квадрокоптера, що включає підключення та налаштування передавача і приймача, є одним з найважливіших для забезпечення стабільного і надійного зв'язку між вами та квадрокоптером під час польоту. Цей процес вимагає точної налаштування, оскільки будь-яка помилка на цьому етапі може призвести до неправильної роботи системи управління, що, в свою чергу, загрожує безпеці польоту.

Першим кроком є підключення передавача до приймача. Для цього слід чітко дотримуватися інструкцій виробника для конкретної моделі передавача і приймача, оскільки різні виробники можуть мати свої особливості підключення. Важливо правильно вибрати та підключити відповідний протокол зв'язку, залежно від використовуваного обладнання. Одними з найпоширеніших протоколів є SBUS (Serial Bus) і CRSF (Crossfire), які гарантують стабільний і швидкий зв'язок між передавачем і приймачем. Підключення через ці протоколи забезпечує правильну передачу даних і дозволяє квадрокоптеру отримувати необхідну інформацію для коректного реагування на команди.

При підключенні приймача до польотного контролера важливо переконатися, що з'єднання здійснене через правильні порти на контролері. Зазвичай на приймачі є кілька виходів для підключення, але важливо підключити правильні пін-контакти, щоб уникнути проблем із зчитуванням сигналу або некоректною роботою каналів управління.

Після того як передавач і приймач з'єднані, необхідно відкрити Betaflight Configurator, що є основним програмним забезпеченням для налаштування квадрокоптера. У Betaflight можна перевірити правильність роботи всіх каналів передавача. Для цього перейдіть на вкладку Receiver, де побачимо всі канали, що зчитуються з передавача. Це зазвичай чотири основні канали: Throttle (газ), Yaw (поворот по осі Z), Pitch (нахил вперед-назад), та Roll (нахил вліво-вправо).

Важливо перевірити, що кожен з цих каналів відповідає своїй функції, тобто, канал Throttle має регулювати висоту, Yaw - повороти по вертикальній осі, Pitch - рух вперед/назад, а Roll - рух вліво/вправо. Вкладка Receiver показана на рисунку 3.3.

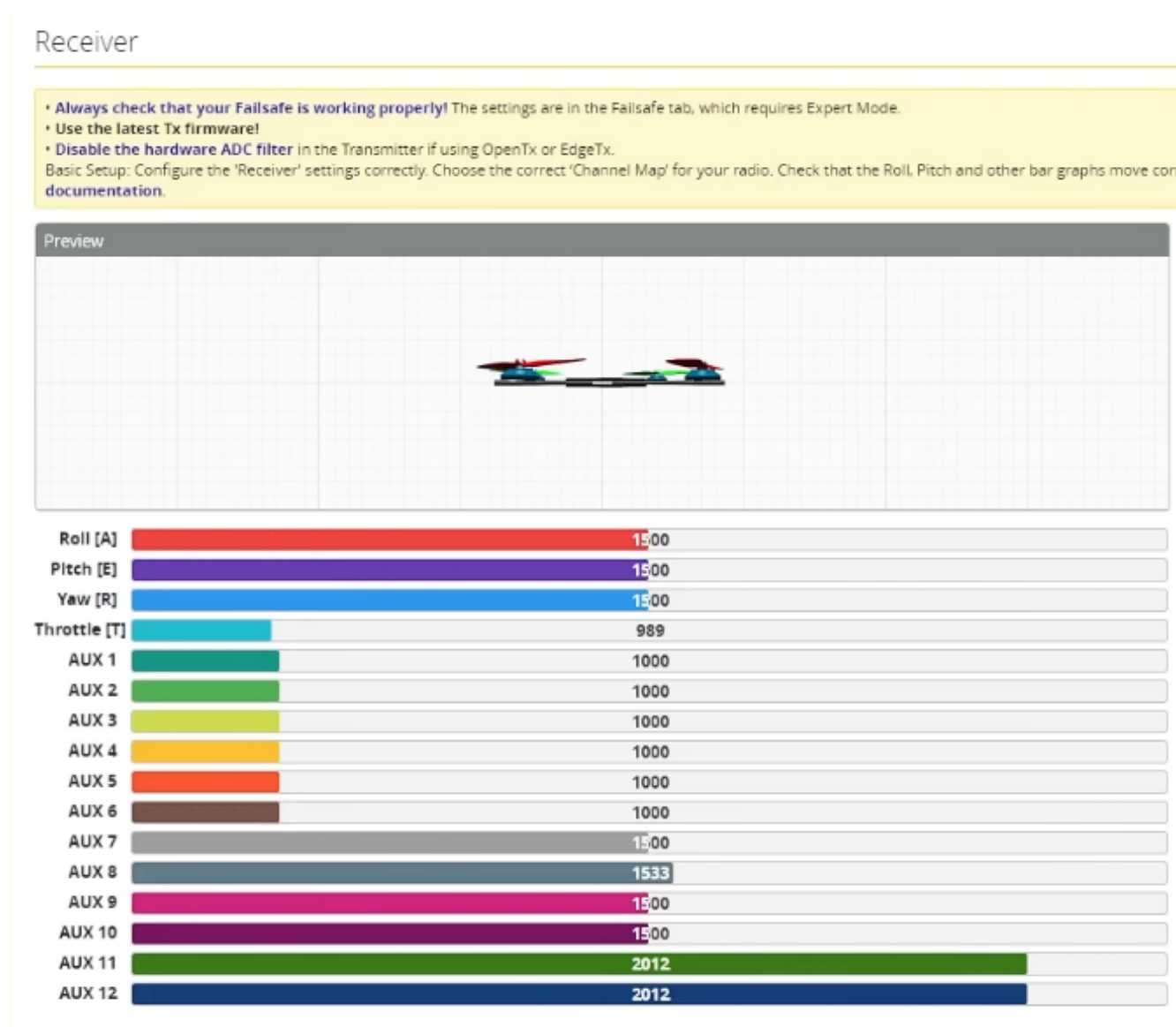


Рисунок 3.3 Вкладка Receiver

Якщо з якоїсь причини канали не відповідають своїм функціям або порядок каналів не відповідає уподобанням, Betaflight дозволяє змінювати їх порядок, що дасть можливість налаштувати квадрокоптер під потреби. Наприклад, якщо канал Yaw не працює так, як очікувалося, можемо змінити його призначення, використовуючи налаштування у вкладці Receiver.

Ще одним важливим кроком є налаштування режимів польоту квадрокоптера. У Betaflight Configurator є можливість створювати та налаштовувати різні режими для дрону, які визначають його поведінку в польоті. Це можуть бути такі режими, як стабілізація, акробатичний режим чи інші спеціалізовані режими. Наприклад, в режимі стабілізації квадрокоптер буде автоматично утримувати горизонтальне положення і не дозволить вийти за межі заданого кута нахилу, що є корисним для новачків. В акробатичному режимі отримуємо повний контроль над усіма осями руху і можете виконувати складні маневри, такі як flips, rolls або швидкі повороти.

Для налаштування цих режимів у Betaflight потрібно перейти до вкладки Modes і визначити, які саме перемикачі на передавачі будуть відповідати за активацію кожного з режимів. Це дозволяє легко перемикатися між різними режимами під час польоту за допомогою передавача.

Після налаштування каналів та режимів польоту потрібно перевірити, чи правильно працюють усі системи. Для цього необхідно рухати стиками на передавачі і спостерігати за змінами, які відображаються в Betaflight Configurator. Потрібно побачити, як канали на екрані відповідають на команди: кожен канал має реагувати на рухи стиків, і в межах вкладки Receiver має відобразитися точна реакція передавача.

Якщо якась функція не працює належним чином, наприклад, канал не відповідає на команди або дрон виконує неправильні рухи, слід перевірити з'єднання між приймачем і передавачем, а також перепідключити кабелі або перевірити налаштування в програмі. Можливо, необхідно зробити додаткові налаштування або провести калібрування приймача.

Цей етап налаштування передавача і приймача є надзвичайно важливим, оскільки від нього залежить, наскільки точно і стабільно квадрокоптер буде реагувати на команди під час польоту. Для забезпечення надійного та точного управління важливо ретельно перевірити кожен канал та режим, а також провести тестування в реальних умовах. Пам'ятайте, що будь-яка помилка в налаштуваннях

може призвести до проблем із управлінням, що особливо важливо, коли квадрокоптер знаходиться на великій висоті або під час складних маневрів.

Розглянемо п'ятий крок. Калібрування регуляторів швидкості (ESC) є важливою процедурою для забезпечення синхронної та коректної роботи двигунів квадрокоптера. Це дозволяє досягти стабільної роботи дрона та уникнути проблем, пов'язаних із неправильним налаштуванням моторів. Калібрування можна виконати через Betaflight Configurator, дотримуючись кількох простих кроків.

Перш за все, потрібно перейти на вкладку “Motors” у Betaflight Configurator, де будуть зібрані всі налаштування, що стосуються роботи моторів і регуляторів швидкості. Важливо уважно прочитати попередження, що з'являється на екрані, адже цей процес передбачає обертання моторів на високих швидкостях. Для безпеки перед початком калібрування потрібно від'єднати пропелери.

Далі потрібно увімкнути повзунок “Master”, який відповідає за загальний рівень потужності, і встановити його на максимальне значення. Це дозволить ESC синхронізувати роботу двигунів на максимальних оборотах. Після цього підключіть акумулятор до квадрокоптера і дочекайтесь звукового сигналу від ESC, який свідчитиме про те, що регулятори швидкості готові до калібрування. Вкладка моторів показана на рисунку 3.4.

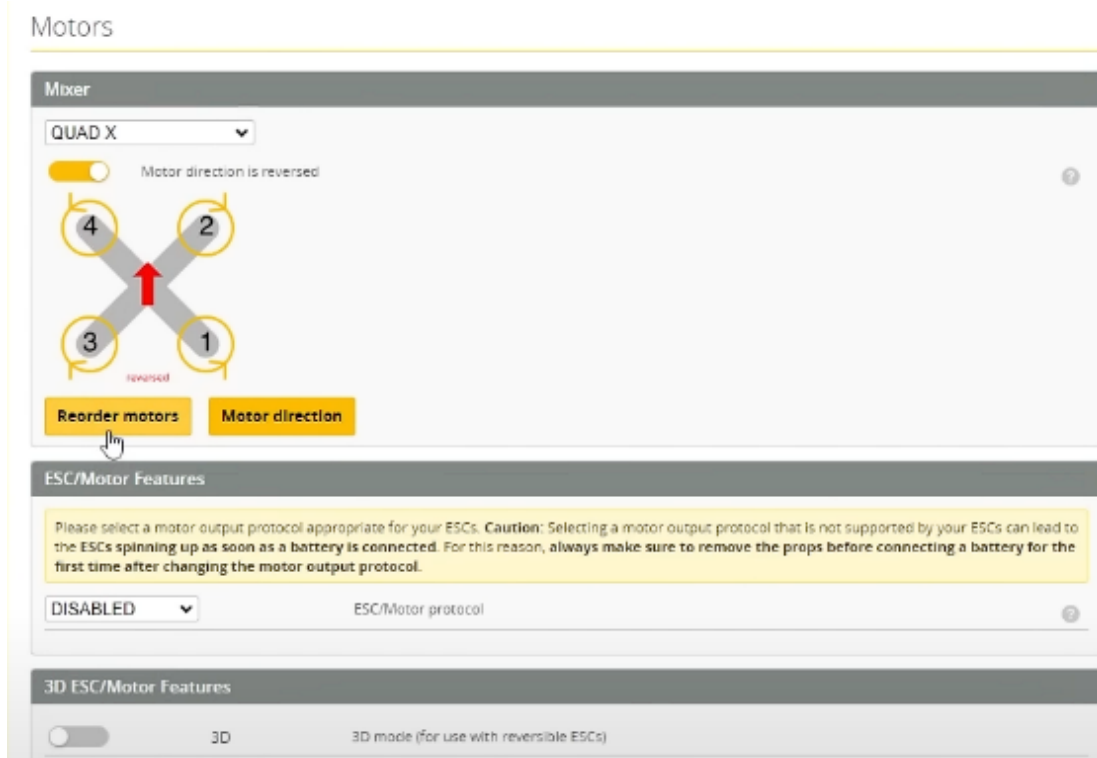


Рисунок 3.4 - Вкладка Motors

Коли ESC видасть сигнал, потрібно повернути повзунок “Master” в мінімальне положення. Це завершить процес калібрування, і після цього регулятори будуть налаштовані на відповідний рівень потужності для кожного мотора. Потрібно почекати кілька секунд, щоб система завершила калібрування, а потім можна буде продовжити перевірку роботи двигунів.

Перевірте роботу моторів, поступово збільшуючи потужність через повзунок “Master” та спостерігаючи за їхньою рівномірною роботою. Якщо мотори працюють коректно, обертаючись з однаковою швидкістю без зайвих коливань або затримок, можна вважати калібрування успішним. Якщо виникають проблеми, слід перевірити налаштування ESC або з'єднання між компонентами квадрокоптера.

Розглянемо шостий крок. Налаштування PID-контролю є одним з найбільш важливих етапів у налаштуванні квадрокоптера, оскільки від нього залежить стабільність польоту та швидка реакція дрона на команди. PID (пропорційно-інтегрально-диференціальний) контроль - це алгоритм, який визначає, як дрон реагує на відхилення від заданого курсу або траєкторії. Кожен з компонентів PID-контролю має свою роль у забезпеченні плавного і точного польоту квадрокоптера.

P (пропорційний) компонент визначає, як швидко квадрокоптер реагуватиме на відхилення від заданої траєкторії. Чим більше відхилення, тим сильніша реакція дрона. Збільшення значення P збільшує чутливість дрона до відхилень, але занадто велике значення може призвести до перенавантаження системи і надмірних рухів.

I (інтегральний) компонент компенсує накопичені помилки протягом часу. Це особливо корисно, коли квадрокоптер тривалий час відхиляється від курсу, наприклад, через вітер. Інтегральний компонент забезпечує відновлення траєкторії, поступово усуваючи відхилення, які не були усунуті пропорційним компонентом. Якщо значення I занадто велике, це може призвести до вібрацій та коливань дрона.

D (диференціальний) компонент відповідає за зменшення коливань, що виникають після різких змін у положенні дрона. D-компонент зменшує нестабільність і допомагає забезпечити більш плавний рух дрону. Високе значення D може зробити політ більш стабільним, але занадто велике значення призведе до того, що дрон буде надмірно реагувати на швидкі зміни в його положенні, що може призвести до надмірних коливань або повільної реакції. Вкладка PID-контролю показана на рисунку 3.5.

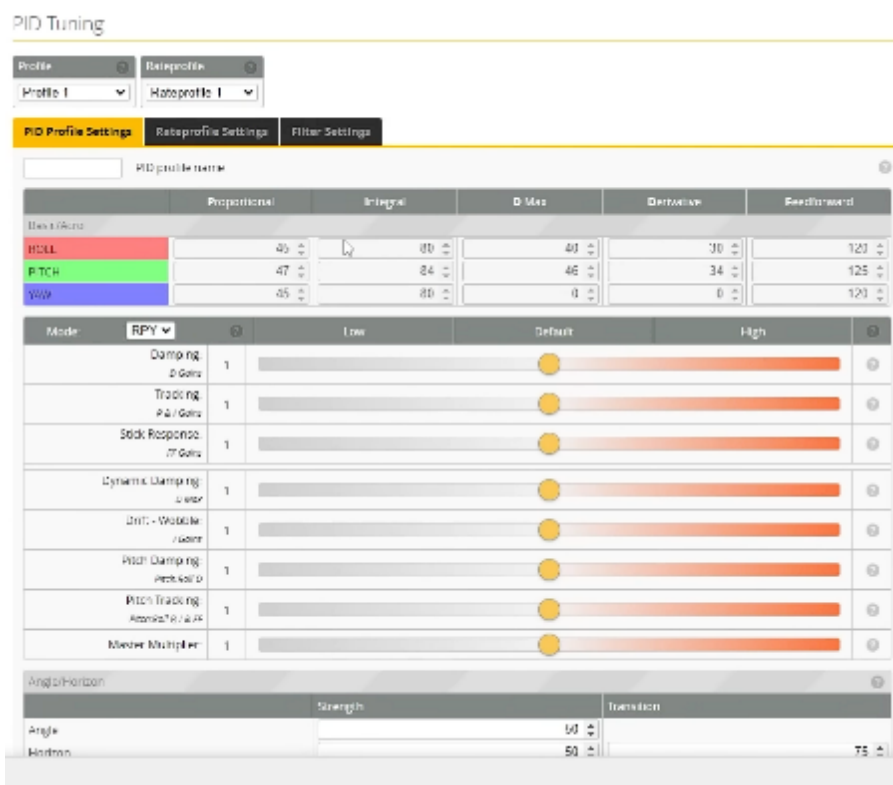


Рисунок 3.5 - Вкладка налаштування PID-контролю

Початкове налаштування PID починається з відкриття вкладки PID Tuning у Betaflight Configurator. Тут побачимо три основні параметри для кожного з каналів - Roll, Pitch та Yaw. Для кожного з цих параметрів необхідно налаштувати значення P, I і D.

При налаштуванні значень PID важливо звернути увагу на реакцію квадрокоптера під час тестового польоту. Якщо дрон починає тремтяти або коливатися під час маневрів, це може бути ознакою того, що значення D занадто велике, і слід зменшити його, щоб усунути надмірні вібрації. Якщо квадрокоптер повільно реагує на команди управління, спробуйте збільшити значення P для покращення чутливості та швидкості реакції на зміни траєкторії. Якщо квадрокоптер після відхилення занадто повільно повертається до центральної позиції, це може свідчити про необхідність коригування значення I. Збільшення значення I допоможе квадрокоптеру швидше повернутися на потрібний курс.

Для подальшої оптимізації PID можна використовувати функцію автотюнінгу в Betaflight, якщо прошивка підтримує таку опцію. Це дозволить програмі автоматично підібрати оптимальні значення PID на основі характеристик дрону та умов польоту. Важливо пам'ятати, що автотюнінг може не завжди бути ідеальним, тому після його виконання варто ще раз перевірити дрон під час тестового польоту.

Не забувайте, що налаштування PID потребує практичного тестування. Тому варто проводити ці тести на відкритих майданчиках або в безпечних зонах, де дрон не матиме перешкод, і де мінімізується ризик пошкоджень в разі помилок у налаштуваннях. Тестування різних значень PID дозволяє знайти оптимальний баланс між чутливістю, стабільністю та плавністю польоту квадрокоптера.

Сьомий крок. Після завершення налаштування та калібрування всіх систем квадрокоптера важливо провести ретельну перевірку та тестування, щоб переконатися в його готовності до безпечного польоту. Цей етап включає передполітну перевірку, тестовий політ та коригування налаштувань, якщо це необхідно.

Передполітна перевірка - це перша важлива процедура, яку потрібно виконати перед кожним польотом. Почніть з того, що переконайтеся, що всі пропелери правильно встановлені та закріплені. Пропелери повинні бути надійно зафіксовані, щоб уникнути їх випадкового зняття під час польоту, що може призвести до аварії. Також обов'язково перевірте рівень заряду акумулятора. Недостатній заряд може призвести до втрати живлення під час польоту, що небезпечно для безпеки. Перевірте, чи є зв'язок між передавачем і приймачем: для цього переконайтеся, що на екрані передавача видно з'єднання, а сам квадрокоптер реагує на команди.

Тестовий політ - це наступний важливий крок. Для тестування вибирайте відкритий, безпечний майданчик, де немає перешкод і людей. Розпочніть тестовий політ, піднявши квадрокоптер на невелику висоту, щоб перевірити його стійкість. Під час цього польоту спостерігайте за тим, як квадрокоптер реагує на команди. Перевірте, як він виконує рухи вперед, назад, вліво, вправо, а також повороти за годинниковою і проти годинникової стрілки. Це допоможе оцінити стабільність і чутливість квадрокоптера до управління.

Коригування налаштувань може бути необхідне, якщо виявляться проблеми під час тестового польоту. Наприклад, якщо квадрокоптер починає відхилятися від заданого курсу або має надмірну чутливість, можна провести додаткові налаштування PID у Betaflight Configurator. Якщо під час тесту квадрокоптер не реагує на команди або має нестабільну поведінку, можна вносити зміни в параметри PID, зменшуючи або збільшуючи значення відповідних компонентів. Переконайтеся, що всі системи працюють стабільно, а квадрокоптер адекватно реагує на команди, і немає непередбачуваних коливань або поштовхів.

Фінальна перевірка включає кілька коротких польотів для перевірки всіх налаштувань у реальних умовах. Під час цих польотів зверніть увагу на перегрів двигунів та інших компонентів квадрокоптера. Переконайтеся, що всі частини дрону працюють належним чином і не перегріваються. Також перевірте якість відеосигналу та стійкість роботи FPV-системи. Важливо, щоб відео передавач і приймач забезпечували чітке зображення без значних перешкод або затримок.

Після того, як переконаємося в стабільності роботи всіх систем, можна вважати квадрокоптер готовим до регулярного використання.

Налаштування і перевірка квадрокоптера перед кожним польотом є важливим етапом, що гарантує безпеку і надійність під час польотів.

Налаштування та калібрування FPV-квадрокоптера - це детальний та відповідальний процес, який вимагає часу та уваги до кожної дрібниці. Важливо розуміти, що кожен етап налаштування має безпосередній вплив на стабільність та передбачуваність польотів, що є критично важливим для безпеки дрону та його ефективності. Хоча цей процес може здатися складним, правильне налаштування забезпечує значні переваги, зокрема покращену керованість, зменшення ймовірності виникнення технічних проблем та підвищену надійність під час польотів.

Дотримуючись крок за кроком інструкцій і ретельно налаштовуючи всі компоненти квадрокоптера, зможемо отримати оптимальні льотні характеристики, які дозволять дрону реагувати на команди з високою точністю та стабільністю. Це знижує ймовірність аварій, особливо під час виконання складних маневрів або в умовах, що можуть впливати на стабільність польоту, таких як вітер або зміни висоти.

Крім того, уважність до деталей під час налаштування мінімізує ризики технічних проблем, таких як перегрівання двигунів, неправильна робота системи стабілізації або проблеми з передавачем і приймачем, що є важливими для безпеки як самого квадрокоптера, так і оточуючих. Калібрування акселерометрів, ESC та налаштування PID допомагають досягти максимальної ефективності роботи всіх систем, що сприяє більш комфортним і безпечним польотам.

В кінцевому рахунку, всі зусилля, витрачені на налаштування та калібрування квадрокоптера, призводять до значного покращення якості польотів і задоволення від процесу. Зможемо насолоджуватися стабільними та передбачуваними польотами, зберігаючи впевненість у тому, що квадрокоптер працює на максимальній потужності та з максимальною точністю.

## 3.2 Налаштування зв'язку

Прошивка модуля ELRS (ExpressLRS) - це процес оновлення програмного забезпечення на апаратному рівні, який дозволяє налаштувати і оптимізувати його роботу для досягнення максимальної ефективності. Оновлення прошивки важливе для забезпечення сумісності з різними типами обладнання, таких як пульти управління, приймачі та інші компоненти системи. Завдяки цьому, можна налаштувати модуль під конкретні потреби, зберігаючи високу стабільність зв'язку, що є критично важливим для безпечного керування дроном.

Прошивка також включає в себе оптимізацію алгоритмів передачі сигналу, що підвищує якість зв'язку, особливо на великих відстанях або в умовах наявності перешкод. Це дозволяє зменшити ймовірність втрати сигналу або виникнення перешкод у передачі даних. Окрім цього, оновлення прошивки може додати нові можливості та функції, наприклад, покращене управління підключеннями або нові режими, які можуть бути важливими для специфічних конфігурацій користувача.

Найважливіше - це виправлення помилок у попередніх версіях, що знижує ризики технічних збоїв та підвищує надійність системи в реальних умовах польоту. Завдяки постійним оновленням, отримуєте доступ до нових оптимізацій, що робить систему більш стабільною і надійною, що в свою чергу дозволяє зменшити ризик непередбачених ситуацій під час польоту.

### 3.2.1 Прошивка модулю ELRS RX

Деякі з цих параметрів присутні як на передавачі (TX), так і на приймачі (RX). Важливо, щоб ці параметри збігалися на модулі передавача та приймачі, інакше вони не зможуть з'єднатися. Команди `team2400` і `team900` також мають кілька спільних параметрів, але деякі параметри є унікальними для їхнього частотного діапазону. Нижче показані спільні параметри, доступні для передавачів `team2400` і `team900` відповідно.

Регуляторні домени зв'язку:

- Regulatory\_Domain\_AU\_915
- Regulatory\_Domain\_EU\_868
- Regulatory\_Domain\_IN\_866
- Regulatory\_Domain\_FCC\_915
- Regulatory\_Domain\_ISM\_2400
- Regulatory\_Domain\_EU\_CE\_2400

Регуляторний домен - це набір правил і обмежень, які визначають, які частоти дозволено використовувати для бездротового зв'язку в певній країні або регіоні. Наприклад, у Європейському Союзі є свої обмеження, в США - інші, в Азії - ще інші. Ці обмеження вводяться для того, щоб бездротові пристрої не створювали завад або конфліктів із іншими системами, які працюють на тих самих частотах.

Коли налаштовується своє обладнання, наприклад передавач (TX), потрібно обрати саме той регіон, в якому знаходиться дрон. Це важливо, тому що вибір регіону визначає доступний частотний діапазон, на якому може працювати модуль. У тексті зазначається, що регуляторні домени ЄС тепер підтримують технологію LBT (Listen Before Talk) - це означає, що перед тим, як передати сигнал, пристрій "прислуховується", чи канал вільний. Це зменшує ризик конфліктів із іншими передавачами в тому ж діапазоні. Відповідність вимогам LBT є обов'язковою у багатьох країнах Європи, тому це важлива технічна новина для користувачів у цьому регіоні.

Фрази прив'язки (binding phrase) - це спеціальний рядок символів (тобто, слово або коротка фраза), який можна ввести на своєму передавачі та приймачі, щоб автоматично пов'язати їх між собою без потреби у традиційній процедурі прив'язки. У звичайному випадку, щоб передавач "побачив" приймач, потрібно вручну виконувати процедуру - наприклад, натискати кнопку на приймачі, з'єднувати кабелі або використовувати програму-конфігуратор. Але якщо задати однакову фразу на обох пристроях, вони автоматично розпізнають один одного і з'єднуються. Це значно спрощує налаштування, особливо якщо в тебе кілька моделей або часто перепрошивається обладнання.

При цьому фраза має бути унікальною - якщо кілька людей поруч із тобою використовуватимуть однакову фразу, їхні пристрої можуть випадково підключитись один до одного. Тому важливо вигадати щось неповторне, як-от «FlyFast93» чи «SkyRacerX7». Також є технічне обмеження: фраза повинна складатися тільки з букв латинського алфавіту та цифр, без пробілів, символів чи кирилиці. Якщо приймач використовує прошивку, яка не підтримує цю функцію (а це буває у старіших версіях або в спеціальних прошивках), то фраза не спрацює і доведеться прив'язуватися звичайним способом.

Мережеві параметри пристрою, який може підключатися до Wi-Fi. Параметри HOME\_WIFI\_SSID та HOME\_WIFI\_PASSWORD дозволяють заздалегідь задати ім'я мережі Wi-Fi та пароль до неї, щоб пристрій автоматично підключився до цієї мережі, коли буде працювати в режимі оновлення прошивки через Wi-Fi (режим "WiFi Update"). Це дуже зручно, особливо коли прошивається пристрій у знайомому середовищі - вдома, у майстерні, тощо.

Якщо задані правильні параметри мережі, пристрій сам спробує підключитись до цієї мережі без участі користувача. Це дозволяє уникнути зайвого кроку - перемикання Wi-Fi мережі на комп'ютері чи телефоні, щоб під'єднатися до пристрою вручну. Усе оновлення може відбуватись автоматично через наявне з'єднання. Якщо ж пристрій не зможе знайти або підключитися до цієї мережі (наприклад, якщо пароль невірний або мережа недоступна), тоді він створить власну Wi-Fi мережу. У такому випадку доведеться під'єднуватись до неї вручну, як зазвичай.

Параметр UNLOCK\_HIGHER\_POWER дозволяє пристрою працювати на вищій потужності сигналу, якщо це підтримується апаратно. Проте в цьому є певний ризик. Увімкнення цієї опції може сильно навантажити внутрішні компоненти пристрою, особливо радіочастотні модулі, які можуть нагріватись настільки, що потенційно можуть вийти з ладу. Автор тексту навіть з гумором попереджає, що пристрій може "розплавитися", намагаючись дати більше потужності.

Тому перед активацією цієї функції важливо переконатися, що у пристрої належне охолодження - наприклад, є радіатор або навіть активне охолодження (вентилятор), якщо потрібно. Якщо такої перевірки не буде, а охолодження виявиться недостатнім, підвищена потужність може призвести до перегріву й поломки пристрою. `UART_INVERTED`

Параметр `UART_INVERTED` стосується способу, яким обробляються сигнали в послідовному порту (UART). Деякі пристрої очікують «інверсний» сигнал, а деякі - звичайний. Більшість сучасних пультів (як-от QX7, Tango 2, TX16S) використовують інверсну логіку UART, тому цей параметр має бути увімкнений.

Натомість інші моделі, як-от T8SG V2 або ті, що працюють на прошивці Deviation, працюють з «прямим» UART, тому інверсію сигналу потрібно вимкнути.

Це налаштування особливо важливе при використанні модулів на базі ESP32, адже тільки вони підтримують це коректно - інші чіпи можуть не мати такої гнучкості в налаштуванні `UART.Receiver Only Options`

Щоб передавач і приймач могли синхронізуватись і зв'язатись між собою (тобто виконати процес прив'язки), їхні налаштування мають повністю збігатися. Інакше вони не зможуть «побачити» один одного, і зв'язок між ними не встановиться. Усі параметри, які були налаштовані на передавачі - такі як частота, фраза прив'язки, регіон, протокол тощо - мають бути точно такими ж і на приймачі.

Більшість параметрів, які задаються на передавальному модулі, однаково застосовуються і до приймачів. Вони працюють у парі, тому мають дотримуватися тих самих правил і конфігурацій. Але крім загальних параметрів, є ще деякі специфічні, які стосуються лише приймачів і їхньої взаємодії з іншим обладнанням, наприклад, з польотним контролером дрону.

Одне з таких специфічних налаштувань - це інверсія вихідного сигналу. Існує параметр під назвою `RCVR_INVERT_TX`, який відповідає саме за це. Його потрібно враховувати, якщо польотний контролер, до якого підключається приймач, має лише один вхід, позначений як RXI або SBUS, і цей вхід очікує інверсований сигнал. У такому випадку, щоб сигнал від приймача був сумісний із

цим входом, потрібно увімкнути інверсію на стороні приймача - тобто активувати цей параметр.

Важливо розуміти, що ця опція не перетворює сигнал на SBUS - це залишається протокол CRSF, просто в інверсованому вигляді. Тобто, у налаштуваннях польотного контролера все одно потрібно обирати CRSF як протокол зв'язку, незалежно від того, увімкнена інверсія чи ні.

Також слід знати, що ця функція підтримується тільки приймачами, побудованими на основі мікроконтролера ESP (наприклад, ESP32 чи ESP8285). Якщо приймач не базується на ESP, ця опція може бути недоступною або не працювати належним чином.

Параметр `USE_R9MM_R9MINI_SBUS` стосується тільки приймачів FrSky R9MM та R9Mini. У цих моделях приймачів є кілька виводів (контактів), з яких можна виводити сигнали. Зазвичай протокол CRSF (Crossfire) передається через два бокові контакти, позначені як A9 та A10. Але якщо активувати цей параметр, сигнал CRSF буде виводитись не через ці контакти, а через окремий контакт, позначений на платі приймача як SBUS.

Цей контакт фізично зручний для деяких монтажів, і він подає інверсований сигнал, тобто сигнал з інвертованою логікою, подібно до того, як це робиться у SBUS. Проте важливо наголосити: це не означає, що протокол стає SBUS. Він залишається CRSF, тільки з інверсією, яка може бути потрібна деяким контролерам. Отже, у налаштуваннях польотного контролера завжди має бути обраний CRSF, навіть якщо сигнал іде через SBUS-пін..

Параметр `NO_SYNC_ON_ARM` впливає на те, як часто передаються синхронізуючі пакети, коли дрон перебуває в стані "armed" - тобто готовий до польоту. У нормальному режимі один такий пакет надсилається кожні 5 секунд. Це дозволяє у разі втрати зв'язку швидко знову підключитись до приймача. Якщо ж увімкнути цей параметр, то синхронізуючі пакети не надсилатимуться, коли дрон озброєний. Це може бути доречним, якщо зовсім вимикнути телеметрію (тобто вибрав `Telemetry Ratio = Off`), але в інших випадках краще залишити цей параметр вимкненим. Якщо його увімкнути без крайньої потреби, то у випадку втрати

зв'язку в польоті не можна буде підключитися знову, доки дрон не буде розброєний.

Параметр `LOCK_ON_FIRST_CONNECTION` стосується того, як саме приймач (RX) шукає передавач (TX), коли відбувається розрив зв'язку - тобто фейлсейл. За замовчуванням, коли зв'язок втрачається, ExpressLRS перемикає приймач у режим пошуку - він починає перебирати всі доступні частоти передачі пакетів (рейтплейти), намагаючись знайти ту, на якій працює передавач. Цей процес займає певний час, бо приймач переходить з однієї частоти на іншу, очікуючи на кожній з них визначену кількість часу, щоб перевірити, чи є там сигнал.

Однак, коли активовано `LOCK_ON_FIRST_CONNECTION`, поведінка змінюється. У цьому режимі приймач після першого з'єднання «запам'ятовує» частоту, на якій було з'єднання, і після фейлсейлу не перебирає інші частоти, а залишається на тій самій, очікуючи повторного з'єднання саме на ній. Це робить відновлення зв'язку дуже швидким, адже приймач вже слухає саме ту частоту, з якою він працював раніше. Саме тому цей режим зазвичай рекомендують залишати увімкненим, бо він забезпечує стабільність і швидке повторне з'єднання.

Водночас, бувають ситуації, коли може бути корисно мати можливість примусово перейти на нижчу частоту (тобто на повільніший пакетний рейт). Наприклад, коли дрон втратив зв'язок і впав десь на великій відстані, можна зменшити швидкість передачі на передавачі, щоб збільшити дальність зв'язку й повернути контроль. Але якщо `LOCK_ON_FIRST_CONNECTION` увімкнено, приймач залишиться «заблокованим» на старому швидкому рейтплейті й не зможе з'єднатись із передавачем, що перейшов на повільніший режим. У такому випадку, доведеться перезавантажити приймач, щоб він знову почав перебирати частоти - або просто заздалегідь знати, як керувати цією функцією.

Коли приймач перебирає рейтплейти, він починає з найшвидшого (наприклад, 500 Гц), і поступово зменшує швидкість, поки не дійде до найповільнішого. На кожній частоті він очікує певну кількість часу, яка розраховується за формулою: `PACKET_INTERVAL * PACKS_PER_HOP *`

`HOP_COUNT` \* 1.1. Наприклад, для частоти 250 Гц це буде приблизно 1.4 секунди на кожному кроці. Якщо за цей час буде отримано хоча б один правильний пакет, приймач залишиться на цій частоті трохи довше (час очікування збільшується в 10 разів), щоб мати більше шансів на з'єднання.

Навіть якщо `LOCK_ON_FIRST_CONNECTION` увімкнено, все одно можна змінити частоту вручну - наприклад, через скрипт `ELRS.lua` на пульті або просто вимкнувши й увімкнувши приймач.

Щодо параметра `FAN_MIN_RUNTIME`, він стосується пристроїв передавача (TX), які мають вбудований вентилятор для охолодження. Іноді, коли рівень потужності передавання змінюється, вентилятор може вмикатись і вимикатись дуже часто, буквально кожні кілька секунд. Це не тільки шумно й неприємно, а й може зменшити термін служби вентилятора через надмірне навантаження.

Щоб уникнути цього, параметр `FAN_MIN_RUNTIME` дозволяє задати мінімальний час роботи вентилятора, навіть якщо рівень потужності вже впав нижче встановленого порогу, при якому вентилятор мав би вимкнутись. Наприклад, якщо встановлено 30 секунд, то після увімкнення вентилятор обов'язково пропрацює щонайменше 30 секунд, навіть якщо ситуація змінилася раніше.

Якщо цей параметр не вказано, за замовчуванням вважається, що він дорівнює 30 секундам. Значення можна задати в діапазоні від 0 до 254. Але навіть якщо встановити `FAN_MIN_RUNTIME = 0`, буде коротка затримка перед увімкненням вентилятора, яка закладена на апаратному рівні й не може бути вимкнена.

Ці параметри пов'язані з сумісністю між передавальним або приймальним модулем і тим обладнанням, з яким вони працюють - наприклад, пультами керування, польотними контролерами або іншими пристроями. У різних системах і мікроконтролерах сигнали можуть бути або «нормальними», або інверсованими (тобто перевернута логіка сигналу), і ці параметри допомагають узгодити сигнал.

Параметр `UART_INVERTED` використовується на передавачах, які базуються на ESP32. Він потрібен для того, щоб передавач міг правильно

працювати з пультами, які подають інверсований CRSF-сигнал. Приклади таких пультів - FrSky QX7, TBS Tango 2 та RadioMaster TX16S. У більшості випадків цей параметр повинен бути увімкненим, щоб забезпечити сумісність. Але є винятки - наприклад, якщо вткористовується передавач Jumper T8SG V2 або пульт працює на прошивці Deviation, тоді цей параметр треба вимкнути, бо ті пристрої не інвертують сигнал.

Параметр RCVR\_INVERT\_TX працює тільки на приймачах, які побудовані на ESP8266 або ESP8285. Його завдання - інвертувати вихідний передавальний сигнал з приймача, щоб його можна було підключити до інверсованого входу на польотному контролері. Такий вхід зазвичай підписаний як SBUS, RXI або просто інверсований UART RX. Але важливо розуміти, що це не означає, що виходить SBUS-протокол - все одно йдеться про CRSF, тільки в інверсованому вигляді. У налаштуваннях польотного контролера завжди слід вказувати саме CRSF як активний протокол зв'язку, навіть якщо сигнал йде через SBUS-пін. Також май на увазі: коли активовано цей режим, прошивка через Betaflight Passthrough не працюватиме - залишиться тільки можливість оновлення через Wi-Fi. RX-пін, який відповідає за телеметрію, при цьому не змінюється.

Наступний параметр - RCVR\_UART\_BAUD=420000 - дозволяє вручну встановити нестандартну швидкість передачі даних між приймачем і польотним контролером. За замовчуванням використовується 420000 бод, але деякі контролери (наприклад, KISS FC v1) працюють на інших швидкостях, як-от 400000. Або ж якщо підключити приймач до сторонніх пристроїв - наприклад, Arduino, де частіше використовується 115200 бод, - тоді цей параметр допоможе уникнути конфліктів і налаштувати правильну комунікацію.

Параметр USE\_R9MM\_R9MINI\_SBUS стосується тільки приймачів FrSky R9MM та R9Mini. У цих моделях є кілька пінів для передачі сигналу. За замовчуванням CRSF-сигнал виходить через два бокові пін-и (позначені як A9 і A10). Але якщо активувати цей параметр, то CRSF буде виводитися через пін, підписаний SBUS. Цей пін - інверсований, що зручно, якщо польотний контролер,

наприклад F4, має тільки інверсований вхід UART RX і не підтримує «звичайний» сигнал.

Однак у цього режиму є важливі обмеження. Він підтримує тільки односторонній зв'язок: приймач може передавати дані до контролера, але не може отримувати телеметрію у відповідь, тобто дані назад до пульта не передаються. Також втрачається можливість прошивки приймача через TX-модуль. Тому використовувати цей режим слід лише тоді, коли в тебе немає інших варіантів фізичного підключення.

Ці параметри стосуються мережевих можливостей модулів, які мають вбудований Wi-Fi - тобто зазвичай це приймачі або передавачі, що працюють на чіпах ESP8285 або ESP32. Завдяки Wi-Fi з'являється можливість оновлювати прошивку бездротово, без підключення кабелем або використання кнопок.

Почнемо з параметра `AUTO_WIFI_ON_INTERVAL=30`. Його потрібно обов'язково вказати, якщо потрібно мати можливість оновлювати приймач (RX) через Wi-Fi без натискання фізичної кнопки на самому пристрої. Цей параметр задає кількість секунд (у цьому випадку 30), які пройдуть після увімкнення живлення, перш ніж модуль автоматично увімкне Wi-Fi, якщо він не з'єднався з передавачем. Тобто якщо приймач увімкнувся, але не отримав сигналу від TX, він сам увімкне Wi-Fi режим і створить власну точку доступу, до якої можна підключитися зі смартфона або комп'ютера. Далі достатньо відкрити у браузері адресу <http://10.0.0.1>, і потрапимо на сторінку оновлення прошивки.

Ще два важливі параметри - `HOME_WIFI_SSID` і `HOME_WIFI_PASSWORD` - це назва та пароль до твоєї домашньої Wi-Fi мережі. Якщо ці параметри задано, то під час переходу в режим Wi-Fi оновлення пристрій спочатку спробує підключитися до твоєї домашньої мережі, використовуючи ці дані. Якщо з'єднання вдається, то оновлення прошивки можна виконати з будь-якого пристрою у тій самій мережі - комп'ютера, смартфона, планшета тощо.

У разі успішного підключення, сторінка оновлення для передавача буде доступна за адресою [http://elrs\\_tx.local](http://elrs_tx.local), а для приймача - за адресою

[http://elrs\\_rx.local](http://elrs_rx.local). Це значно зручніше, ніж підключатись до окремої Wi-Fi точки, створеної модулем.

Якщо підключення до домашньої Wi-Fi не вдалося (наприклад, невірний пароль або слабкий сигнал), тоді пристрій автоматично створить власну мережу Wi-Fi з SSID на зразок ExpressLRS RX чи `elrs_tx`, до якої можна підключитися вручну. Потім все одно можеш зайти на сторінку оновлення через ту саму адресу <http://10.0.0.1>.

`JUST_BEEP_ONCE` дозволяє вибрати, чи повинен передавач видавати один короткий дзвінок при запуску, чи грати мелодію на початку роботи. За замовчуванням передавач відтворює мелодію старту, але якщо не подобається ця опція, можна увімкнути параметр `JUST_BEEP_ONCE`, щоб вимкнути мелодію та залишити тільки один дзвінок.

Для користувацьких налаштувань стартової мелодії можна використати параметр `MY_STARTUP_MELODY`. Це дає можливість задати власну мелодію для старту передавача. Є два формати для вводу мелодії: `BLHeli32` та `RTTTL`. В першому варіанті потрібно вказати музичний рядок, швидкість (BPM) та, за бажанням, зсув по півтону для транспонування мелодії. Це дозволяє, наприклад, підлаштувати мелодію під свій смак. Для тих, хто хоче створювати свої власні мелодії, на YouTube каналі `Rox Wolf` можна знайти багато прикладів мелодій `BLHeli32`, хоча для написання мелодій може знадобитись певний досвід. Також доступні ресурси для навчання, як `Sheet Music 101` і `BLHeli Piano`.

Інший формат - `RTTTL` (`Ring Tone Text Transfer Language`) - дозволяє створити мелодію через просту текстову нотацію, де параметри розділяються двокрапкою (наприклад, "`Mario:d=4,o=5,b=100:32p,16e6...`"). `RTTTL` менш гнучкий, але дозволяє швидко створювати прості мелодії.

Якщо ж потрібні звуки при запуску, можна увімкнути параметр `DISABLE_STARTUP_BEEP`, щоб вимкнути дзвінок при старті передавача. Однак цей параметр не забороняє дзвінок при встановленні з'єднання з `CRSF` - тобто, коли передавач зв'язується з приймачем.

Для повного вимкнення всіх звукових сигналів на передавачі є опція `DISABLE_ALL_BEEPS`, яка відключає всі звукові сигнали на передавачі в будь-якому стані, включаючи статусні сигнали.

Ще один цікавий параметр - `USE_TX_BACKPACK`, який активує підтримку для підключення ESP8266 модуля до передавача. Цей модуль дозволяє інтегруватися з VRX модулями для бездротової передачі відео та телеметрії через Wi-Fi. Якщо передавач має вбудовану підтримку такого модуля, цей параметр активується автоматично. У разі потреби його можна додати й до інших пристроїв, якщо потрібно використовувати функції безпроводної інтеграції з іншими модулями.

Ці параметри стосуються налаштувань відлагодження (`debug`) для передавачів і приймачів, які допомагають збирати журнали помилок та технічні дані про роботу пристроїв. Вони корисні для діагностики проблем чи оптимізації роботи системи.

Параметр `DEBUG_LOG` дозволяє включити відображення повідомлень для відлагодження. Ці повідомлення можуть бути виведені через UART порт, що підключений до TX Backpack (якщо він доступний), або ж через головний CRSF UART, наприклад, на приймачі. Це дозволяє побачити важливі повідомлення для діагностики безпосередньо під час роботи пристрою.

Якщо потрібно побачити більш детальні повідомлення про роботу системи, можна увімкнути `DEBUG_LOG_VERBOSE`. Це дасть можливість переглядати не тільки основні помилки та повідомлення, а й додаткові "шумні" дані, які можуть бути корисними для глибшого розуміння того, що відбувається з пристроєм.

Опція `DEBUG_RX_SCOREBOARD` дозволяє отримувати інформацію про кожен пакет, який отримує приймач, або ж пропускає. Кожен отриманий чи втрачений пакет буде позначений літерою. Це може бути корисним для відлагодження роботи приймача, щоб точно зрозуміти, які пакети втрачаються або отримуються.

Параметр `DEBUG_CRSF_NO_OUTPUT` вимикає відправку CRSF повідомлень через CRSF UART на приймачі. Це дає змогу переглядати лише

відлагоджувальні дані без змішування їх з повідомленнями CRSF. Це корисно, якщо потрібно бачити лише журнали відлагодження, а не потік CRSF.

З параметром `DEBUG_RCVR_LINKSTATS` на екрані з'являться деталі по кожному каналу: ID каналу, антена, RSSI, LQ (Link Quality), SNR (Signal to Noise Ratio), потужність сигналу, FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), та відхилення по часу. Ці дані будуть виводитися на серіальний порт, і можна бачити, як змінюється якість зв'язку для кожного каналу. Важливо, що для використання цієї опції потрібно оновити як TX, так і RX з увімкненим параметром.

Опція `DEBUG_FREQ_CORRECTION` дозволяє включити відстеження корекції частоти в статистиці зв'язку на приймачі. Це дає можливість отримати інформацію про відхилення частоти RF сигналу, що впливає на якість з'єднання (SNR). Вона також трохи знижує швидкість передачі пакетів на Team2.4, щоб включити додаткові дані, які потрібні для корекції частоти. Значення корекції частоти будуть відображатися в звіті LinkStats з масштабом від -127 до +127, де 127 - це максимальне відхилення частоти. Параметр корекції частоти також працює для Team900, але з іншими значеннями (100 кГц). Ця опція важлива, якщо використовуєш динамічну потужність передачі, оскільки її зміна може бути автоматично зменшена в залежності від корекції частоти.

### 3.2.2 Прошивка модулю ELRS TX

Для початку прошивки передавального модуля TX потрібно відкрити програму ExpressLRS Configurator на комп'ютері. Це офіційний інструмент, який використовується для створення та встановлення прошивки на модулі ExpressLRS. Якщо ця програма ще не встановлена, її можна завантажити з офіційного репозиторію на GitHub. Після встановлення її слід запустити.

У верхній частині вікна потрібно переконатися, що активною є вкладка Official Releases. Це важливо, оскільки саме тут знаходяться стабільні офіційні версії прошивок, рекомендовані для більшості користувачів. Робота з офіційними

релізами мінімізує ризик помилок і забезпечує сумісність між компонентами системи.

Далі необхідно вибрати ту версію прошивки, яку планується встановити на TX модуль. У випадаючому меню слід обрати потрібний реліз ExpressLRS. Якщо немає особливої причини використовувати старішу версію, рекомендується вибрати останню стабільну. Дуже важливо, щоб однакова версія була встановлена як на передавачі (TX), так і на приймачі (RX), інакше між ними не буде зв'язку, оскільки система не дозволяє з'єднання між пристроями з різними версіями прошивки.

Наступним кроком у процесі підготовки до прошивки є вибір категорії пристрою, моделі передавача, а також способу прошивки. Перевірка версії прошивки показано на рисунку 3.10.

У програмі ExpressLRS Configurator потрібно знайти та встановити правильну категорію пристрою. У полі Device Category слід обрати значення, яке відповідає типу твого передавача. Наприклад, якщо використовується апаратура з вбудованим модулем ExpressLRS від RadioMaster, то обираєш категорію RadioMaster 2.4 GHz.

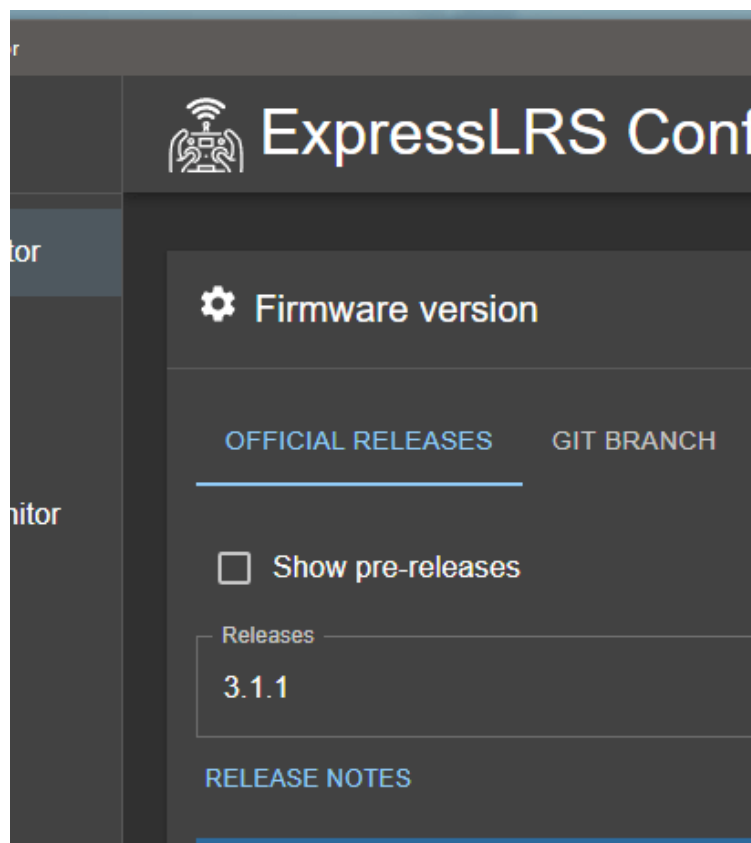


Рисунок 3.10 - Перевіряємо версію прошивки

Після цього у полі Device потрібно обрати конкретну модель передавача, яка відповідає твоєму обладнанню. Наприклад, це може бути RadioMaster Zorro 2.4GHz TX, TX16S, TX12, Boxer, Pocket або MT12 - залежно від того, яка саме у тебе апаратура. Важливо обрати точну модель, оскільки це визначає правильні параметри прошивки, сумісні з апаратною частиною твого пристрою.

Коли категорія та модель обрані, потрібно задати спосіб прошивки. Для цього у полі Flashing Method необхідно встановити значення WiFi. Це дозволить виконати прошивку без підключення передавача до комп'ютера через кабель - достатньо буде доступу до Wi-Fi. Вибір методу показано на рисунку 3.11.

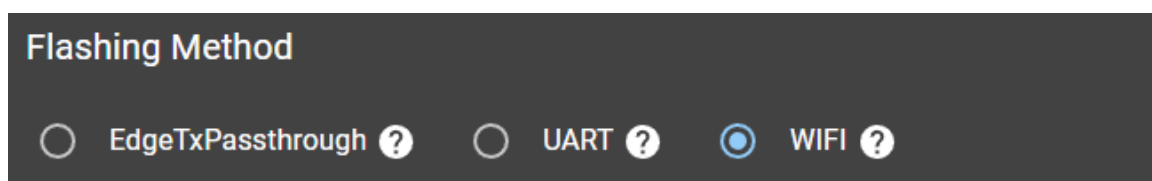


Рисунок 3.11 - Вибір методу прошивки

На цьому етапі необхідно задати налаштування прошивки для твого пристрою. Ці параметри визначають, як саме працюватиме передавач, і вони мають відповідати як технічним вимогам, так і місцевим нормам.

Перш за все потрібно вибрати параметр `Regulatory Domain`. Це обов'язковий пункт, який визначає допустимий діапазон частот і потужність радіосигналу відповідно до законодавства тієї країни, в якій буде літати. Наприклад, для України або країн Євросоюзу слід вибрати `EU`. Важливо дотримуватися цих вимог, оскільки вони регулюються на рівні радіочастотного контролю.

Далі, у полі `Binding Phrase`, можна ввести унікальну фразу, яка дозволить автоматично поєднувати (байндити) передавач з приймачами без потреби в ручному байндингу. Хоча це поле необов'язкове, дуже рекомендується його заповнити. Варто використати фразу, яка складається лише з латинських літер і цифр (без пробілів і спецсимволів), наприклад: `MyDroneSetup123`. Усі пристрої, які мають однакову `binding phrase`, будуть автоматично під'єднуватися один до одного. Якщо фрази не збігатимуться, синхронізація не відбудеться.

Також, за бажанням, можна ввести параметри доступу до домашньої Wi-Fi мережі - назву мережі (`SSID`) та пароль. Це дозволить пристрою автоматично підключатися до цієї мережі під час входу в Wi-Fi режим, що особливо зручно для майбутніх оновлень прошивки чи налаштувань без зайвих дій із твоєї сторони. Якщо ці дані не вказати, пристрій просто створить власну Wi-Fi мережу для доступу вручну.

Коли всі потрібні параметри налаштовані, потрібно натиснути кнопку `Build`. Програма розпочне процес компіляції прошивки відповідно до заданих параметрів. Після завершення цього процесу отримаєш готовий файл прошивки, який буде використано на наступному етапі.

Після завершення процесу створення прошивки (`Build`), на екрані автоматично з'явиться вікно з тимчасовою папкою, в якій зберігаються згенеровані файли прошивки. Ця папка містить усі необхідні бінарні файли, зокрема той, який буде безпосередньо прошиватися у передавач.

Дуже важливо не закривати це вікно, оскільки на наступних етапах будемо використовувати файл з цієї папки. Якщо випадково закрити її - доведеться або заново компілювати прошивку, або вручну шукати тимчасове місце збереження файлів на диску, що може бути не дуже зручно.

Якщо поєрібно використовувати смартфон або планшет для завантаження прошивки в передавач через Wi-Fi, зараз саме час скопіювати файл прошивки з цієї папки на мобільний пристрій. Це можна зробити через USB-кабель, Bluetooth, хмару чи інші зручні способи передачі файлів. Найголовніше - зберегти доступ до цього файлу на тому пристрої, з якого потрібно запускати оновлення.

Коли файл збережено або підготовлено, можна переходити до безпосереднього завантаження прошивки в модуль.

З виходом ExpressLRS версії 3.3.0 та ExpressLRS Configurator версії 1.6.0, після компіляції прошивки у тимчасовій папці з'являється лише один файл - `firmware.bin`. Саме цей файл необхідно використовувати на наступних етапах прошивки, тож переконайся, що він у тебе під рукою або скопійований на відповідний пристрій.

Далі потрібно перейти до меню Lua-скриптів на твоїй апаратурі. Для цього увімкни радіоапаратуру і натисни клавішу SYS (зазвичай знаходиться зліва на передній панелі). Це відкриє меню інструментів (Tools Menu), де зібрані доступні Lua-скрипти.

У списку доступних скриптів прокрути вниз і знайди скрипт ExpressLRS. Вибери його для запуску. Цей скрипт відкриє графічний інтерфейс управління ExpressLRS, який дозволяє виконувати налаштування, оновлення прошивки та інші дії безпосередньо з апаратури. Інтерфейс на пульті показано на рисунку 3.12.

Якщо Lua-скрипт ExpressLRS відсутній у меню інструментів на твоїй апаратурі, це означає, що його потрібно завантажити вручну. Перейди на офіційну сторінку ExpressLRS (наприклад, на GitHub-репозиторій проєкту), знайди останню версію Lua-скрипта і завантаж файл `ExpressLRS.lua`.

Після завантаження підключи апаратуру до комп'ютера як USB-накопичувач або встав SD-карту в карддрідер, а потім скопіюй файл скрипта в папку за наступним шляхом на SD-карті.

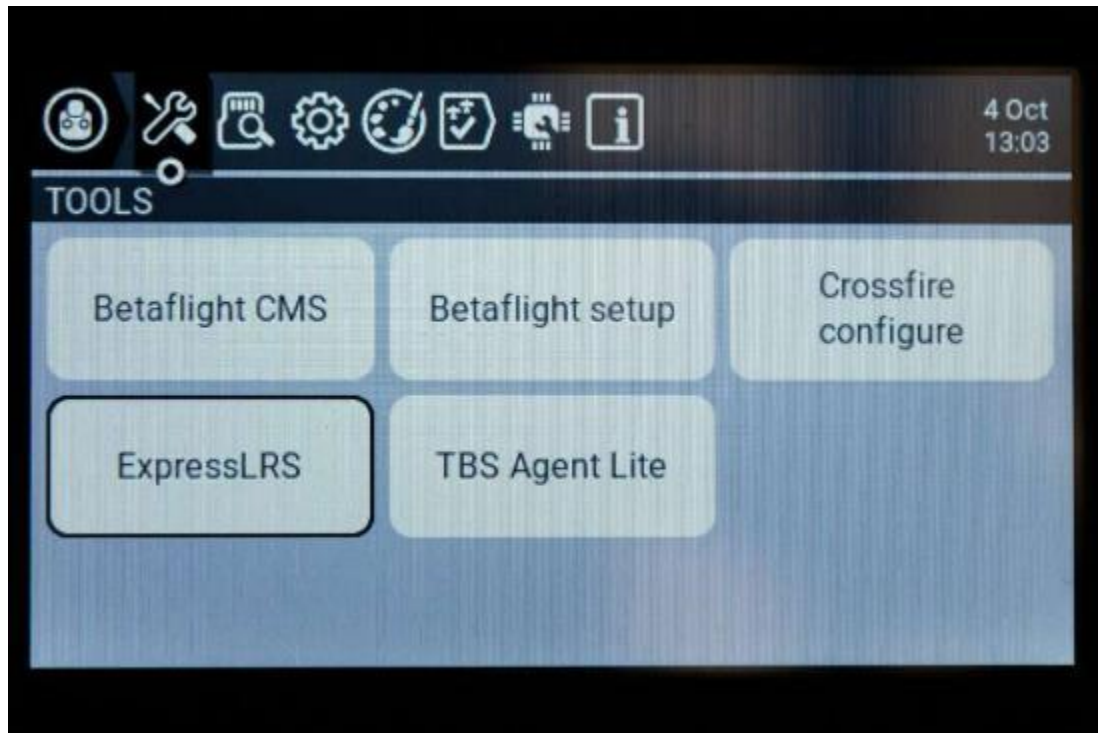


Рисунок 3.12 - Інтерфейс на пульті керування

Scripts/Tools/ - це стандартне розташування для Lua-скриптів на більшості апаратур, таких як RadioMaster, FrSky тощо. Після того як файл буде скопійований, безпечно від'єднай SD-карту або саму апаратуру від комп'ютера.

Тепер знову натисни кнопку SYS на передавачі, відкрий меню інструментів і прокрути вниз - скрипт ExpressLRS має з'явитися у списку. Виділи його і натисни Enter, щоб запустити. Після цього можна буде переходити до підключення до Wi-Fi і завантаження прошивки. Вибір опцій показано на рисунку 3.13.

Якщо після запуску Lua-скрипта ExpressLRS він зависає на екрані з написом "Loading...", це зазвичай свідчить про те, що апаратура або модуль передавача ще не повністю підготовлені до роботи з ExpressLRS. У такому випадку варто повернутися до етапів початкової підготовки передавача - переконатися, що прошивка встановлена правильно, вибрано відповідний протокол (наприклад, CRSF), а також що модуль ExpressLRS активований у налаштуваннях радіо.

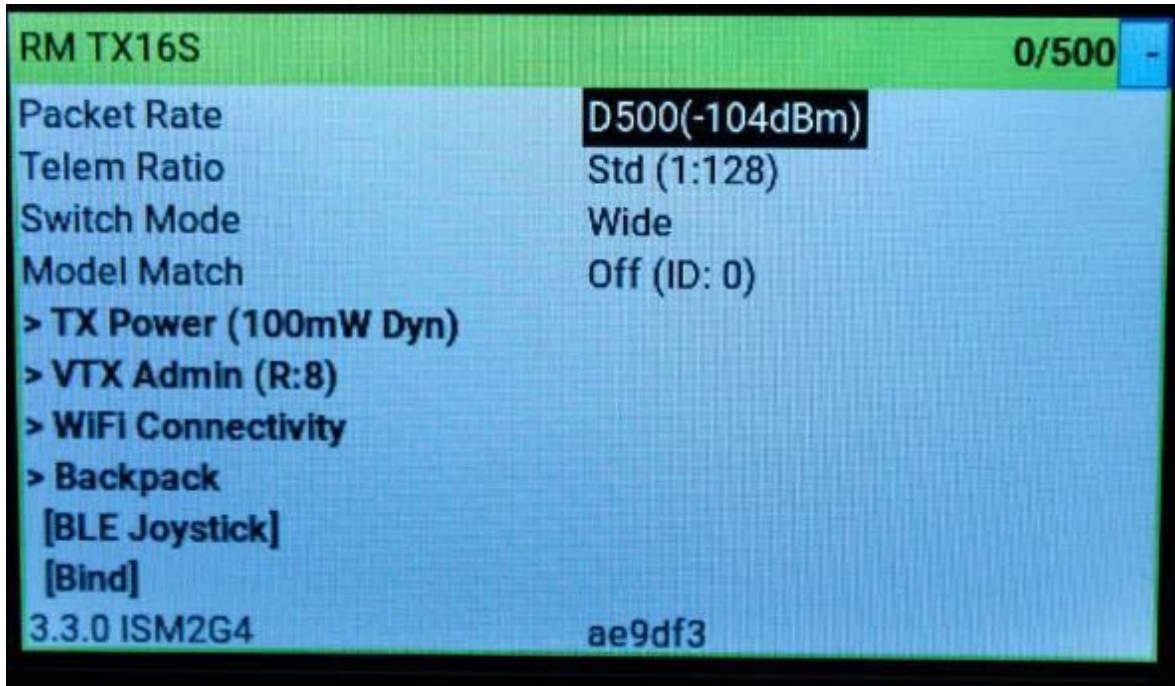


Рисунок 3.13 - Вибір опцій на пульті керування

Коли все перевірено й виправлено, можеш знову зайти в Lua-скрипт. У головному меню скрипта прокрути вниз до пункту WiFi Connectivity і натисни Enter для переходу до параметрів підключення.

У меню підключення вибери пункт Enable WiFi і знову натисни Enter. Після цього модуль увійде в режим очікування Wi-Fi-прошивки - він створить власну Wi-Fi мережу, до якої можна буде підключитися з комп'ютера чи смартфона для завантаження файлу firmware.bin.

Після активації Wi-Fi з'явиться екран із написом WiFi Running - це означає, що передавальний модуль (TX) успішно перейшов у режим Wi-Fi. На цьому етапі модуль створює власну точку доступу Wi-Fi, до якої можна підключитися з будь-якого пристрою з підтримкою Wi-Fi - наприклад, з ноутбука, планшета або смартфона. Активація через Wi-Fi показана на рисунку 3.14.

Використай цей пристрій, щоб просканувати наявні мережі Wi-Fi. Серед них має з'явитися мережа з іменем, яке містить ExpressLRS TX або щось схоже. Це й є створена модулем точка доступу. Підключися до неї, використовуючи пароль expresslrs (усі літери маленькі).

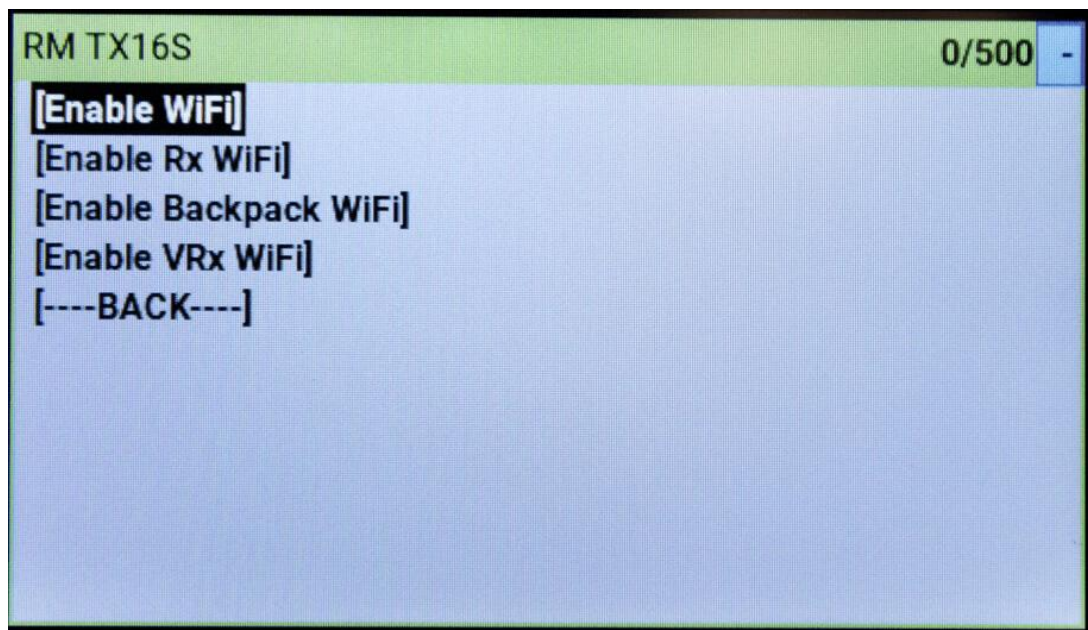


Рисунок 3.14 - Активація Wi-Fi

Якщо раніше вже прошивався модуль і вказував свій домашній Wi-Fi (через параметри HOME\_WIFI\_SSID та HOME\_WIFI\_PASSWORD), і цей Wi-Fi є доступним - тоді модуль автоматично підключиться до домашньої мережі, не створюючи власної точки доступу. У такому випадку потрібно буде зайти на модуль через локальну адресу [http://elrs\\_tx.local](http://elrs_tx.local) замість стандартної IP-адреси.

Після того як підключиться до точки доступу ExpressLRS, відкрий браузер і в адресному рядку введи IP-адресу 10.0.0.1, потім натисни Enter. Завантажиться веб-інтерфейс ExpressLRS - саме з нього відбудуватиметься завантаження прошивки до модуля. Підключення до ELRS через Wi-Fi показана на рисунку 3.15.

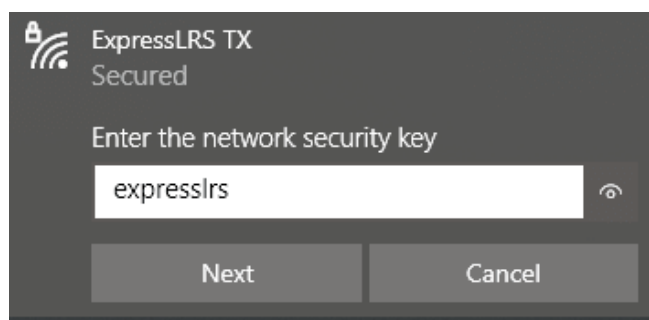


Рисунок 3.15 - Підключення до Wi-Fi

Після того як завантажиться веб-інтерфейс ExpressLRS за адресою 10.0.0.1, на екрані з'явиться головна сторінка керування модулем. У верхній частині інтерфейсу знайди та натисни вкладку Update.

Ця вкладка відкриє сторінку, де можна завантажити нову прошивку до модуля. Саме тут оберемо файл прошивки, який був згенерований раніше під час компіляції в ExpressLRS Configurator і збережений у тимчасову папку. Інтерфейс екрану прошивки показано на рисунку 3.16.

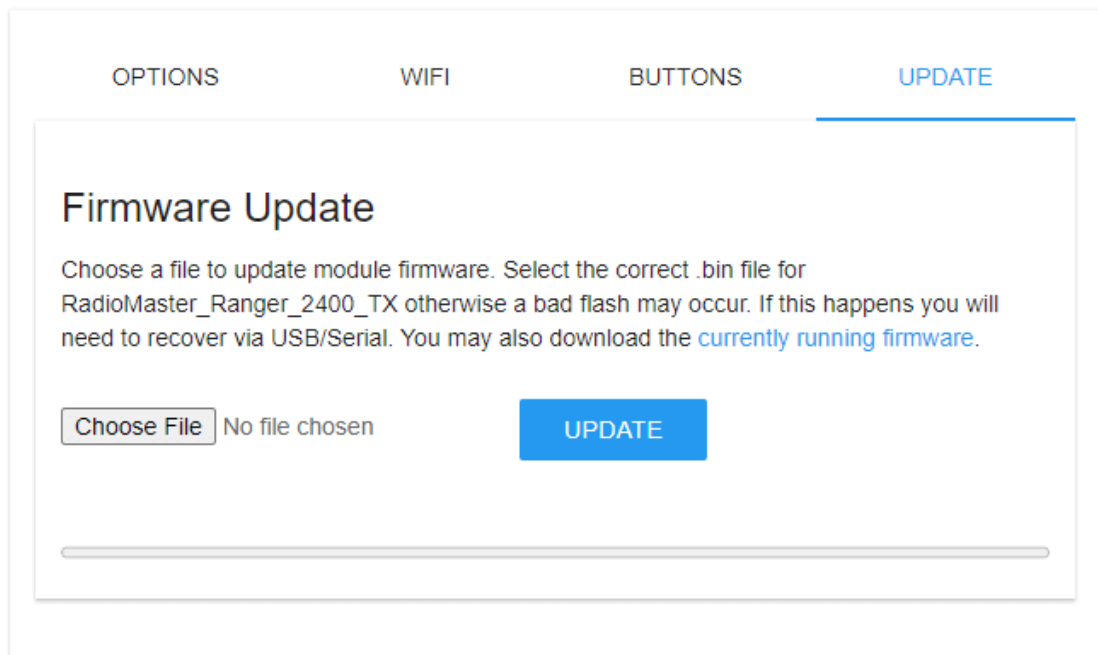


Рисунок 3.16 - Інтерфейс екрану прошивки.

Якщо модуль передавача (TX) все ще працює на більш ранній версії прошивки, то вкладка Update не буде доступна. У такому випадку потрібно прокрутити сторінку вниз, щоб знайти розділ Firmware Update.

Цей розділ дозволить вручну завантажити нову прошивку на модуль. Після того як знайдемо цей розділ, зможеш вибрати файл прошивки, який вже був збережений раніше (файл firmware.bin), і завантажити його на модуль.

Перетягни файл прошивки з тимчасової папки (Temp) у поле File Upload на сторінці оновлення. Якщо зруйновано структуру папок або переніс файл в інше

місце, можна також натискати кнопку Browse або Choose File, щоб вручну знайти та вибрати файл прошивки.

Після того як файл прошивки буде завантажений, натисни кнопку Update, щоб розпочати процес оновлення прошивки. Тепер потрібно почекати кілька хвилин, поки файл буде завантажено і прошито на модуль.

Після завершення процесу оновлення можна побачити повідомлення про успішне оновлення.

Після успішного завершення процесу оновлення прошивки на веб-інтерфейсі, екран WiFi Running на твоєму радіо повинен зникнути, і радіо повернеться до меню WiFi Connectivity в Lua-скрипті ExpressLRS.

Тепер утримай кнопку RTN (Return) на своєму радіо, щоб вийти з Lua-скрипта ExpressLRS. Після цього знову завантаж скрипт, щоб перевірити версію прошивки ExpressLRS. Це дозволить переконатися, що передавальний модуль був успішно оновлений до нової версії.

### 3.3 Налаштування подвійного зв'язку

True Diversity TX адаптер дозволяє підключити до апаратури управління два зовнішні передавачі одночасно. Це дає можливість передачі радіосигналу керування на два різні радіодіапазони, що забезпечує більшу стабільність і надійність сигналу. Обидва передавачі працюють одночасно, передаючи однакові команди або дані управління, що дозволяє знизити ризик втрати сигналу або перешкод у зв'язку, особливо на великих відстанях або в умовах високих електромагнітних перешкод.

True Diversity RX адаптер дозволяє підключити два приймачі до польотного контролера, що покращує надійність зв'язку між пультом управління і дроном. Адаптер отримує дані від обох приймачів одночасно, але передає в польотний контролер тільки ті дані, які надходять від приймача з кращим рівнем якості зв'язку, вимірюваним через показник Link Quality (LQ). Цей показник коливається від 0 до 100, і чим вищий його рівень, тим кращий зв'язок між передавачем і приймачем.

Таким чином, система True Diversity забезпечує автоматичний перехід між різними парами передавач-приймач у разі погіршення якості зв'язку на одній з них. Якщо один з каналів зв'язку стає нестабільним або втрачає сигнал, система автоматично переключується на інший канал з кращим LQ, забезпечуючи безперебійну передачу даних. Це відбувається без будь-яких додаткових налаштувань або модифікацій у польотному контролері чи апаратурі управління, що важливо для безпечного польоту в умовах можливих перешкод.

RX адаптер має кілька світлодіодних індикаторів, які вказують на стан приймачів і самого адаптера. Перший світлодіодний індикатор, який відповідає за перший приймач, має таку логіку роботи: коли він блимає синім кольором, це означає відсутність зв'язку між передавачем і приймачем. Якщо індикатор горить постійно синім, це вказує на наявність зв'язку між передавачем і приймачем. Якщо світлодіод вимкнений, то приймач вимкнений вручну.

Другий світлодіодний індикатор має ту ж логіку, що і перший, і показує стан другого приймача. Це дозволяє зрозуміти, який з приймачів активний та має зв'язок з передавачем.

Світлодіодний індикатор роботи адаптера показує загальний стан пристрою. Якщо індикатор горить постійно червоним кольором, це означає, що адаптер працює в звичайному режимі. Блімання червоним кольором повільно вказує на те, що адаптер знаходиться в бут-режимі, який необхідний для оновлення прошивки. Якщо червоний світлодіод блимає швидко, це означає, що пристрій знаходиться в режимі налаштувань.

Для управління адаптером використовується кнопка.

Довге натискання цієї кнопки протягом 5 секунд переводить пристрій у режим налаштування.

Для цього необхідно підключити приймач до комп'ютера через USB. В операційній системі з'явиться новий диск, на якому буде текстовий файл з налаштуваннями.

Потрібно відредагувати цей файл, зберегти зміни і перезавантажити пристрій. Якщо пристрій підключений до комп'ютера з затиснутою кнопкою, то він перейде в режим оновлення прошивки.

В системі також з'явиться новий диск, на який потрібно скопіювати файл з новою версією прошивки. Процес оновлення триває до 5 секунд.

Виходи S2, S3 і S4 - це PWM виходи, через які можна напряму керувати сервомоторами, ініціаторами або іншими пристроями, що працюють через PWM, обходячи польотний контролер. Кожен з цих виходів можна налаштувати для призначення будь-якого каналу пульта управління, що дає змогу гнучко інтегрувати різноманітні пристрої в систему. Вихід S1 наразі не використовується, тому він не має функціональності в поточній конфігурації. Пояснення виходів показано на рисунку 3.17.

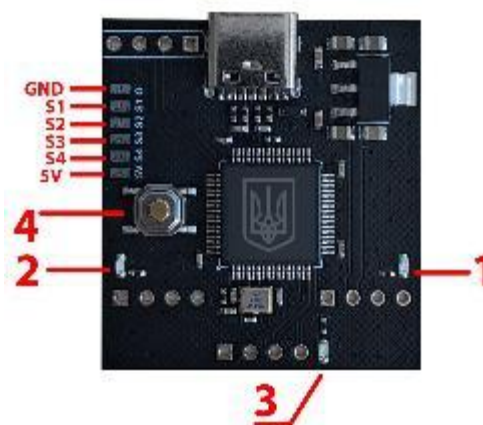


Рисунок 3.17 - True Diversity RX адаптер

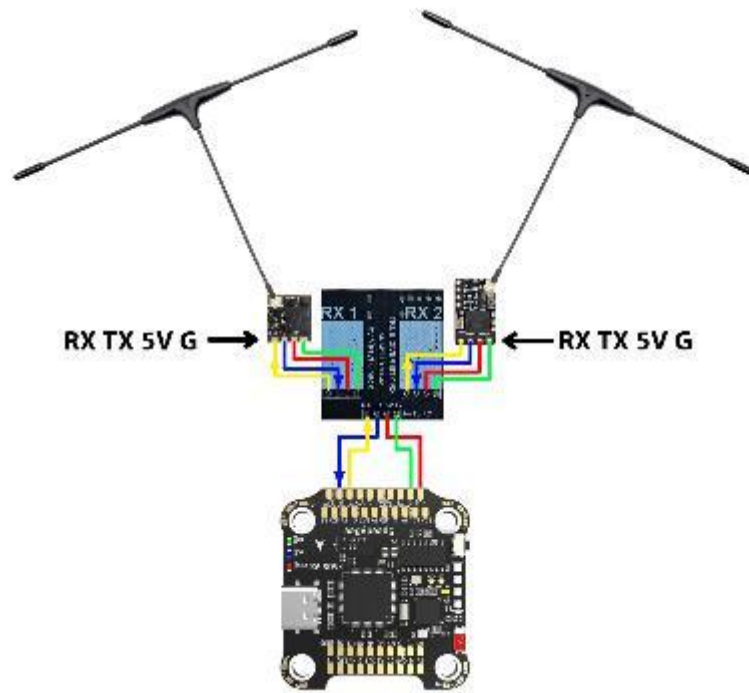


Рисунок 3.18 - Схема підключення RX адаптера

Опис налаштувань в файлі settings.txt для RX адаптера:

rx\_mode - режим роботи RX адаптера - 0 авто, основний режим, в польотний контролер передаються дані від приймача, в якого на даний момент кращий LQ. 1 працює тільки RX1. 2 працює тільки RX2. 3 Режим “майстер” для RX1. 4 режим “майстер” для RX2.

В режимі “мастер” RX1 в польотний контролер будуть передаватись дані з того приймача, який вибраний за допомогою перемикача вказаного параметром master\_chnl.

master\_chnl - канал для вибору перемикача, за допомогою якого можна вибрати з якого приймача будуть передаватись дані в польотний контролер.

Наприклад якщо в налаштуваннях задати rx\_mode=3 та master\_chnl=12, то за допомогою перемикача 12 на першій апаратурі можна перемикає управління між першою і другою апаратурами. Якщо перемикач в нижньому положення - то управління буде передаватись з першої апаратури, якщо у верхньому положенні - то з другої, по центру - вибір з двох по кращому LQ.

Це можна використовувати наприклад в навчальних цілях, коли перша апаратура - тренерська, друга - студентська, і тренер може в будь-який момент за допомогою перемикача примусово перехопити чи передати управління студенту.

`tx_speed` - швидкість UART порта польотного контролера. За замовчуванням 420000. `rx1_speed` - швидкість UART порта приймача RX1. За замовчуванням 420000. `rx2_speed` - швидкість UART порта приймача RX2. За замовчуванням 420000. `button_mode` - режим роботи кнопки. 0 - ігнорувати кнопку, 1 - кнопка працює. `pwm_freq` - частота PWM для виходів S2, S3, S4. Від 50Hz до 250Hz.

`s2_out` - номер каналу для виходу S2. Від 1 до 16. `s3_out` - номер каналу для виходу S3. Від 1 до 16. `s4_out` - номер каналу для виходу S4. Від 1 до 16.

`tlm_rx_num` - експериментальна функція, наразі вимкнена за замовчуванням. Щоб увімкнути, потрібно задати значення 1.

Коли `tlm_rx_num` увімкнено, на OSD поруч з LQ виводиться значення активного приймача (1 або 2). Активний приймач - це приймач в якого на даний момент більший LQ і саме з нього передаються дані в польотний контролер. Приклад OSD показаний на рисунку 3.19.



Рисунок 3.19 - Приклад OSD з активним другим приймачем (RX2)

TX адаптер оснащений кількома індикаторами та кнопками для зручного керування та налаштування.

1. Світлодіодний індикатор першого передавача показує, що в апаратуру управління передається телеметрія з першого передавача, коли він постійно

світиться. Якщо світлодіод вимкнений, це означає, що телеметрія передається з другого передавача.

2. Світлодіодний індикатор другого передавача працює за такою ж логікою: коли він постійно світиться, телеметрія надходить з другого передавача, а коли вимкнений - з першого.

3. Кнопка управління використовується для вибору, з якого передавача отримувати телеметрію. Довге натискання кнопки активує бут-режим, який функціонує так само, як і в RX адаптері, дозволяючи здійснювати оновлення прошивки чи налаштування.

4. Світлодіодний індикатор на самому адаптері має три стани: коли індикатор горить постійно червоним, адаптер працює в звичайному режимі. Якщо він блимає червоним кольором повільно, це вказує на бут-режим, призначений для оновлення прошивки. Швидке блимання червоним сигналізує про режим налаштувань.

5. Конектор для батареї дозволяє підключити акумулятор типу 2S-4S Li-ion або Li-pol. Батарея необхідна для живлення адаптера, оскільки апаратура управління не завжди може забезпечити достатній струм для двох радіо передавачів одночасно.

6. USB Type-C конектор використовується для підключення адаптера до комп'ютера для налаштувань і оновлень прошивки. Опис адаптера показана на рисунку 3.20

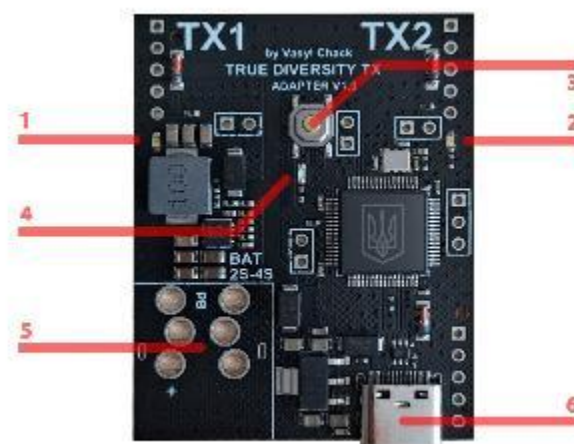


Рисунок 3.20 - Опис TX адаптера

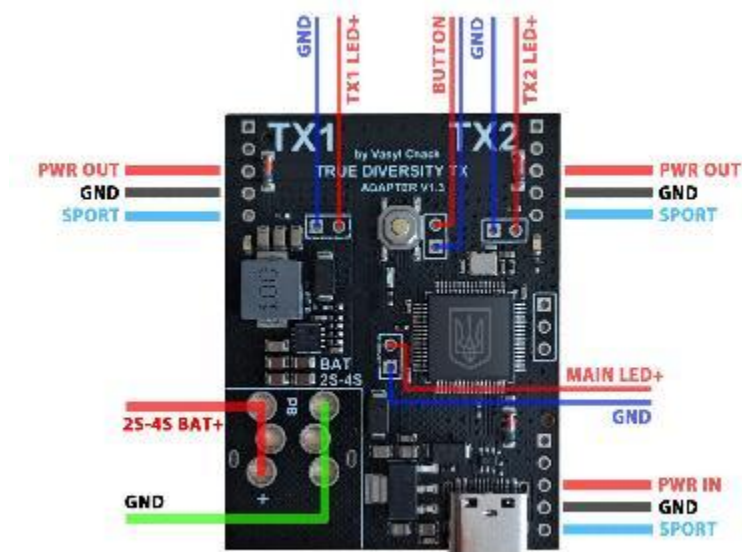


Рисунок 3.21 - Схема конекторів TX адаптера

Параметр `tx_mode` визначає, з якого передавача отримувати телеметрію. Якщо встановлено значення 1, телеметрія буде отримуватись з першого передавача. Якщо значення 2, то телеметрія надходитиме з другого передавача. Схема підключення показана на рисунку 3.22.

`gx_speed` встановлює швидкість UART порту апаратури управління. За замовчуванням цей параметр має значення 400000.

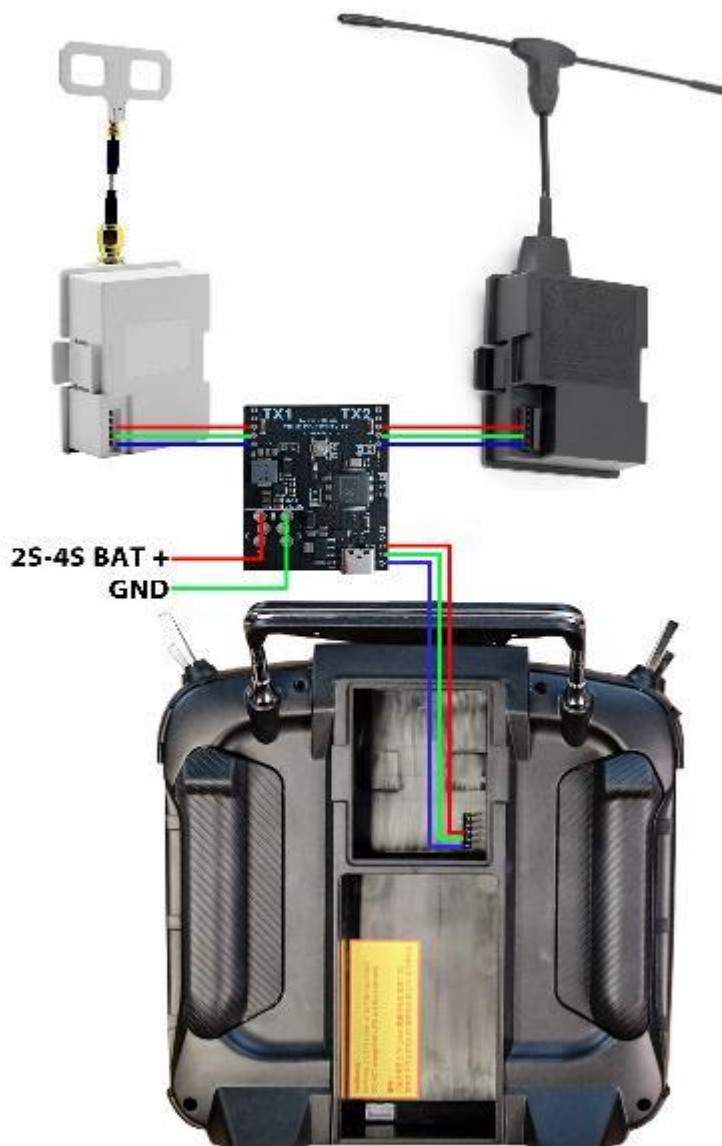


Рисунок 3.22 - Схема підключення TX адаптера

`tx1_speed` і `tx2_speed` визначають швидкість UART портів для першого та другого передавачів відповідно. Обидва параметри мають значення 400000 за замовчуванням.

`rx_invert` відповідає за інвертування сигналу s.port. За замовчуванням цей параметр встановлений на 0, що означає відсутність інверсії сигналу.

Швидкість передачі даних через s.port (UART) за замовчуванням для RX адаптера складає 420000 біт/сек, а для TX адаптера - 400000 біт/сек. Ці швидкості відповідають стандарту CRSF протоколу. Важливо, щоб ці значення були

однаковими як у налаштуваннях адаптерів, так і в апаратурі управління. При необхідності швидкість можна змінити через режим налаштування адаптерів.

Приймач RX1 в RX адаптері має вищий пріоритет над RX2. Якщо рівень якості зв'язку (LQ) у обох приймачів однаковий, то в польотний контролер будуть передаватись дані саме з RX1.

RX і TX адаптери можуть бути підключені каскадом, що дозволяє створити систему з 3 RX адаптерами і 3 TX адаптерами для отримання QUAD-VERSITY - чотирьох каналів зв'язку одночасно.

RX адаптер додає мінімальну затримку до системи зв'язку, яка складає менше 2 мікросекунд (0.000002 сек) при швидкості 420000 біт/сек за стандартом CRSF.

У налаштуваннях апаратури управління потрібно вказати таку ж швидкість (Baudrate) для зовнішнього передавача, як і для TX адаптера. Рекомендується встановити значення 400К. Налаштування показані на рисунку 3.23.



Рисунок 3.23 - Налаштування на пульту керування

Щоб оновити прошивку в RX або TX адаптері, необхідно спочатку вимкнути пристрій. Далі, натискаючи кнопку на самому пристрої, підключіть його до комп'ютера через USB-кабель. Після цього в операційній системі з'явиться новий

накопичувач, який містить кілька файлів. Для RX адаптера це буде файл `fw_rx.bin` та `about.txt`, а для TX адаптера - файл `fw_tx.bin` замість `fw_rx.bin`.

Після підключення потрібно скопіювати нову версію прошивки на пристрій. Якщо операційна система запитає, чи хочете перезаписати існуючий файл, підтвердіть дію. Після завершення копіювання файлів, вимкніть пристрій, щоб завершити процес оновлення.

### 3.4 Висновки третього розділу

У третьому розділі дипломної роботи висвітлено процес програмування та налаштування подвійного зв'язку FPV-дрона, з особливим акцентом на використання протоколу ExpressLRS. Детально описано кожен етап налаштування - від підготовки робочого місця, встановлення програмного забезпечення і прошивки, до калібрування систем та налаштування параметрів польоту. Приділено значну увагу точності конфігурацій, оскільки від цього безпосередньо залежить стабільність керування дроном і якість польотів. Значну частину присвячено безпечному налаштуванню каналів зв'язку, включно з передавачем і приймачем, адаптації регуляторних параметрів (наприклад, потужності сигналу, частотного діапазону) та синхронізації компонентів.

Описано важливі нюанси, пов'язані з оновленням прошивки як приймача, так і передавача, де підкреслюється необхідність відповідності версій та параметрів. Особливої уваги заслуговує використання `binding phrase` для автоматичної синхронізації, що суттєво спрощує конфігурацію системи. Також детально розглянуто підтримку мережевих функцій, налаштування PID-контролю для забезпечення стабільності в польоті, а також заходи безпеки при тестуванні налаштувань у реальних умовах. Загалом, розділ демонструє системний і глибокий підхід до забезпечення надійного, гнучкого та безпечного функціонування FPV-дронів у сучасному технічному середовищі.

## **4 ТЕСТУВАННЯ І НАЛАГОДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПОДВІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

### **4.1 Тестування системи у різних сценаріях**

Метою даного етапу дослідження є всебічна, експериментально обґрунтована перевірка ефективності роботи системи резервованого зв'язку, що побудована на основі адаптерів True Diversity RX і TX та інтегрована в систему керування FPV-дроном. У рамках цього дослідження особливий акцент зроблено на вивченні поведінки системи в реальних умовах експлуатації, де постійно змінюються параметри радіозв'язку, наявні зовнішні перешкоди та відсутня стабільна пряма видимість між пілотом і дроном.

Основним завданням є визначення рівня стійкості каналу зв'язку під час польоту в різних умовах, зокрема при зміні положення дрона відносно передавача, в умовах екранування, щільної забудови або слабкого радіосигналу. Важливою складовою дослідження є вимірювання часу реакції системи на втрату сигналу з одного з приймачів, а також оцінка того, наскільки швидко і коректно відбувається автоматичне перемикання на інший приймач без втрати контролю над дроном. Аналіз алгоритму перемикання базується на об'єктивних показниках якості сигналу, зокрема Link Quality (LQ), і дозволяє оцінити, чи здатна система адекватно обирати канал із кращими параметрами в умовах змінного радіооточення. Окрему увагу приділено перевірці працездатності системи при повному фізичному або електричному відключенні одного з приймачів, а також оцінці здатності адаптерів підтримувати керування навіть у разі часткової деградації обох каналів одночасно.

Під час тестування аналізується не лише технічна ефективність перемикання, але й загальний вплив роботи True Diversity-системи на безпеку польоту, зокрема у моменти активного маневрування дрона на високих швидкостях або в обмеженому просторі. У додатковому аспекті розглядається інформативність та зручність відображення телеметричних даних, таких як номер активного приймача, що дозволяє оператору оперативно контролювати стан зв'язку в польоті. Також

враховуються особливості налаштування адаптерів та їхня сумісність із сучасними протоколами передачі даних, такими як CRSF або ExpressLRS.

Загалом, тестування спрямоване на отримання практичних висновків щодо надійності, адаптивності та відмовостійкості системи True Diversity RX/TX, що є критично важливими параметрами при застосуванні FPV-дронів як у цивільних, так і в особливо складних або бойових умовах експлуатації.

Для проведення експериментального тестування було зібрано FPV-дрон, оснащений сучасним політним контролером з прошивкою Betaflight, який забезпечує повну сумісність із цифровими протоколами зв'язку, включно з CRSF та ExpressLRS. Ключовим елементом системи керування був адаптер True Diversity RX версії 1.4, призначений для підключення двох незалежних приймачів та автоматичного перемикання між ними відповідно до параметра Link Quality. Цей адаптер підключався до UART-порту політного контролера та працював у режимі автоматичного вибору активного каналу на основі якості сигналу.

Зі сторони пульта управління (апаратури типу Radiomaster TX16S) було встановлено True Diversity TX адаптер, який дозволяє одночасно використовувати два окремі модулі радіозв'язку. До цього адаптера були підключені модулі ExpressLRS, один з яких працював у діапазоні 915 МГц, а другий 750 МГц. Такий вибір частот дозволив змодельовати умови польоту в складних середовищах, де необхідна резервована система зв'язку з можливістю перемикання між діапазонами.

Приймачі RX1 та RX2 було встановлено на бортовій частині дрона з дотриманням різної просторової орієнтації антен: один у вертикальному положенні, інший - під кутом до корпусу. Це дозволило симулювати різницю в рівнях прийому залежно від положення дрона у просторі під час реального польоту. Така конфігурація створює більш реалістичне середовище тестування, коли сигнал від одного з каналів може частково втрачатися через орієнтацію або часткове екранування корпусом.

Перед початком тестувань було виконано синхронізацію швидкості обміну даними (baud rate) між усіма компонентами: адаптер True Diversity RX було

налаштовано на стандартну швидкість 420000 бод, а адаптер TX - на 400000 бод відповідно до специфікацій CRSF. Це дозволило забезпечити стабільну комунікацію без втрати пакетів або затримок.

На рівні програмного забезпечення польотний контролер було налаштовано на виведення ключових телеметричних параметрів через систему OSD. Зокрема, в реальному часі відображався показник LQ (Link Quality), що дає змогу оцінити якість поточного каналу зв'язку, а також активний приймач, за допомогою функції `tlm_rx_num`. Це дозволило фіксувати моменти перемикання між каналами під час польоту.

Для збору відео- і телеметричних даних, що дозволяють оцінити зміну параметрів зв'язку у динаміці, застосовувались FPV-окуляри з вбудованим DVR (Digital Video Recorder). Це забезпечило збереження відеозапису кожного польоту з усіма телеметричними накладеннями, що значно полегшило подальший аналіз результатів.

Тестування системи True Diversity RX/TX проводилось у відкритому середовищі на рівній місцевості, що дозволяє мінімізувати неконтрольовані відбиття та перешкоди, характерні для урбанізованого середовища. Таким чином, експерименти мали на меті поступово змінювати умови передачі сигналу та створювати контрольовані порушення зв'язку, які максимально наближаються до реальних ситуацій, з якими може стикатися оператор FPV-дрона.

Польоти здійснювались за ясної погоди, при стабільних метеороумовах, що виключали вплив вітру або атмосферних коливань на результати. Усі дії фіксувались за допомогою DVR-запису в FPV-окулярах, а також додатково відслідковувались у режимі реального часу за допомогою телеметрії, що виводилась на OSD. Протягом кожного сценарію було зафіксовано параметри Link Quality (LQ), номер активного приймача (`tlm_rx_num`), а також будь-які затримки або втрати сигналу.

У межах дослідження було реалізовано п'ять окремих сценаріїв з поступовим ускладненням умов передачі сигналу.

Сценарій 1. Нормальні умови без перешкод. Цей сценарій передбачав політ у відкритій місцевості без жодних фізичних або електромагнітних перешкод. Обидва приймачі працювали в ідентичних умовах, антени були відкриті та орієнтовані симетрично. Метою цього тесту було зафіксувати стабільність роботи системи у нормальному режимі та перевірити, чи не відбувається хибне перемикання між каналами при однаковій якості сигналу. Система не фіксувала жодних втрат керування, обидва канали функціонували однаково добре, а OSD постійно показувало активність одного з приймачів без змін.

Сценарій 2. Часткове екранування одного з приймачів. У цьому випадку один із приймачів (RX1) частково прикривався металевією пластинією, що створювало локальне екранування сигналу. Це дозволяло створити ситуацію, коли один канал поступово втрачає якість зв'язку, тоді як інший залишається активним. Під час виконання маневрів дрона з різною орієнтацією корпусу, система виявила зниження LQ для RX1 і автоматично перемкнулась на RX2. У момент перемикання відображалось оновлення параметра `tlm_rx_num` в OSD. Управління не втрачалось, а перемикання відбулося без видимої затримки для оператора.

Сценарій 3. Повне відключення одного з приймачів. Для перевірки відмовостійкості системи RX1 було повністю знеструмлено - симулювалася втрата живлення або жорстке електромагнітне глушіння. У цьому випадку True Diversity RX адаптер одразу зафіксував повну відсутність сигналу на одному каналі та миттєво передав керування через другий приймач (RX2). Жодного розриву або зависання не було зафіксовано. Поведінка дрона залишалась стабільною, сигнал залишався керованим і безперервним.

Сценарій 4. Обмеження прямої видимості між пілотом і дроном. Для реалізації цього сценарію дрон під час польоту поступово опускався за рельєф місцевості, у результаті чого зв'язок за прямою лінією між передавачем і приймачем тимчасово порушувався. Такі умови моделюють польоти в густій забудові, в лісі або за укриттям. У момент втрати прямої видимості один з каналів втратив якість сигналу, що призвело до автоматичного перемикання на інший

приймач. Завдяки адаптивній роботі системи жодних просідань чи зависань керування не відбулося.

Сценарій 5. Створення перешкод для обох приймачів. Цей експеримент мав на меті дослідити поведінку системи у критичних умовах, коли обидва канали зв'язку починають деградувати. Для цього на дрон одночасно було накладено впливи, які створювали перешкоди для приймання сигналу: обидві антени частково екранувалися та перебували в нестійких положеннях. У такому випадку система перемикалась між приймачами залежно від моментного зниження LQ, що призводило до частих стрибків значення `tlm_rx_num`. Незважаючи на це, повної втрати зв'язку не відбулося. Проте у відеопотоці DVR було зафіксовано декілька короткочасних пропусків кадрів, що вказує на погіршення каналу.

У кожному із зазначених сценаріїв фіксувалися параметри телеметрії, час перемикання між каналами, наявність або відсутність втрат керування, зміни відеосигналу та реакція дрона на дії оператора. Отримані дані дозволяють сформулювати повне уявлення про здатність системи True Diversity RX/TX до адаптації в умовах змінного радіочастотного середовища.

## 4.2 Аналіз тестування.

У процесі експериментальних випробувань системи True Diversity RX/TX було реалізовано низку контрольованих сценаріїв, кожен з яких моделював окремий тип змін або ускладнень у каналі зв'язку. Кожен сценарій дозволив проаналізувати поведінку системи в умовах, які часто зустрічаються при практичному використанні FPV-дронів.

Сценарій 1 – Нормальні умови без перешкод. За умов стабільного прямого зв'язку між передавачем та обома приймачами, без наявності фізичних або електромагнітних перешкод, система працювала у штатному режимі. Приймачі RX1 і RX2 отримували сигнал з однаковою якістю, що підтверджувалося стабільними показниками LQ, які протягом всього польоту залишались в діапазоні 95–100%. Активним залишався лише один канал, і перемикання між каналами не

фіксувалося. Значення параметра `tlm_rx_num` у OSD залишалось постійним. Жодних просідань у керуванні чи перешкод у відео не виявлено. Це свідчить про те, що алгоритм True Diversity коректно розпізнає ситуацію з рівнозначними каналами і не виконує зайвих перемикань, що могло б призвести до нестабільності.

Сценарій 2 – Часткове екранування одного з приймачів. У цьому тесті один з приймачів (RX1) частково закривався металевою пластиною, що спричиняло локальне погіршення якості сигналу. Протягом польоту спостерігалось поступове зниження LQ на RX1 до рівня 60–70%, у той час як RX2 продовжував отримувати сигнал на рівні понад 90%. При досягненні порогового розриву у якості зв'язку, система автоматично перемикалась з RX1 на RX2. Перемикання супроводжувалось оновленням значення `tlm_rx_num` в OSD з "1" на "2", що дозволяло точно зафіксувати момент переходу. Всі дії системи відбувалися з типовою затримкою менш як 10 мілісекунд, що повністю відповідає очікуванням і є непомітним для пілота. При цьому керування дроном залишалось безперервним, а відеопотік - стабільним.

Сценарій 3 – Повне відключення одного з приймачів. Для моделювання аварійної ситуації RX1 було повністю знеструмлено під час польоту. Це імітувало ситуацію втрати живлення або потужного зовнішнього впливу (глушіння). Система миттєво зафіксувала відсутність сигналу з RX1 і автоматично передала керування через RX2. Перемикання відбулося безперешкодно, без ознак втрати сигналу, зависання чи затримок. Значення LQ миттєво зросло до стабільного рівня RX2, а `tlm_rx_num` оновилося відповідно. Така поведінка підтверджує високий ступінь відмовостійкості системи True Diversity у критичних умовах.

Сценарій 4 – Часткова втрата прямої видимості. Під час цього тесту дрон опускався за рельєф місцевості, в результаті чого зникала пряма видимість між апаратурою управління та приймачами на борту. При цьому спостерігалось зниження LQ на активному приймачі та майже одразу - перемикання на інший канал, який забезпечував кращу якість сигналу. Перехід відбувався динамічно під час маневру, без негативного впливу на стабільність польоту. Затримка в передачі команд не спостерігалась, відео передавалось із незначним погіршенням чіткості,

що не впливало на можливість пілотування. Така реакція системи свідчить про її адаптивність до змін радіооточення в реальному часі.

Сценарій 5 – Зниження якості сигналу на обох приймачах. У найскладнішому сценарії обидва приймачі піддавались впливу, який знижував рівень прийому сигналу: один через екранування, інший через зміну положення дрона відносно передавача. У цей момент обидва канали мали змінну якість зв'язку на рівні 40–60% LQ. Система продовжувала намагатись підтримувати найкращий канал, часто перемикаючись між ними. Це супроводжувалось стрибками значення `tlm_rx_num`, а у DVR-записі було зафіксовано декілька коротких провалів відеопотоку (до 0.5 с). Попри це, загального розриву керування не спостерігалось - дрон залишався стабільним, а перемикання між каналами не спричиняло втрат у керуванні. Результати підтверджують, що навіть у критичних умовах система зберігає працездатність, хоча за умов деградації обох каналів до критичних значень можливе погіршення якості відеосигналу.

Загалом результати випробувань демонструють високу адаптивність системи True Diversity RX/TX до різноманітних умов експлуатації. У всіх сценаріях система автоматично визначала пріоритетний канал і оперативно здійснювала перемикання без участі оператора, що дозволяє значно підвищити безпеку та надійність польоту FPV-дрона.

На основі результатів експериментального тестування можна зробити висновок, що система резервованого зв'язку True Diversity RX/TX демонструє високий рівень надійності в умовах часткової або повної втрати одного з каналів зв'язку. Особливістю роботи цієї системи є її здатність до автоматичної оцінки якості сигналу (зокрема за параметром LQ – Link Quality) та миттєвого перемикання на більш стабільний канал без участі оператора. Такий підхід дозволяє усунути затримки, які зазвичай виникають при ручному реагуванні на втрату сигналу, та зберегти безперервність керування дроном навіть у ситуаціях, коли один із приймачів перестає функціонувати.

Важливою перевагою системи є її низька затримка реакції – виявлене в ході випробувань перемикання відбувається за час, що не перевищує 10 мілісекунд. Це

забезпечує плавність та безпеку управління навіть під час складних маневрів. Крім того, система повністю сумісна з телеметричними протоколами (наприклад, CRSF), що дозволяє виводити на OSD інформацію про активний канал (`tlm_rx_num`) і значення якості сигналу в реальному часі. Це значно спрощує діагностику, моніторинг стану зв'язку та дозволяє пілоту контролювати зміну режимів під час польоту.

Ще одним вагомим плюсом є гнучкість налаштувань, які можуть бути виконані через файл конфігурації на microSD-картці. Користувач має змогу змінювати режими роботи адаптера, задавати пріоритети каналів, активувати або деактивувати перемикання вручну тощо. У навчальному режимі (режим "майстер-учень") система дозволяє вручну перемикатися між каналами, передаючи керування від тренера до учня, що робить її корисною не лише в бойових, але й у навчальних або цивільних FPV-сценаріях.

Однак, попри ці переваги, система має низку технічних обмежень, які слід враховувати при її застосуванні. Найбільш критичним є той факт, що у випадках, коли обидва канали одночасно зазнають різкого погіршення якості сигналу, можливе виникнення короткочасних просідань у керуванні або зображенні. Це відбувається через часті перемикання між двома нестабільними джерелами, кожне з яких намагається забезпечити передачу сигналу, але не гарантує повної надійності. У таких ситуаціях система працює на межі своїх можливостей, і хоча повного розриву зв'язку не відбувається, можуть виникати провали у відеопотоці або короткочасні затримки в керуванні.

Ще одним потенційним джерелом проблем є необхідність ретельної синхронізації налаштувань усіх компонентів системи – як приймачів, так і передавачів, а також самого адаптера. Порушення у параметрах UART-зв'язку, невідповідність швидкостей обміну або несумісність версій прошивок можуть призвести до збоїв у роботі або нестабільності перемикання каналів. Отже, перед введенням системи в експлуатацію необхідно провести точну перевірку всіх параметрів конфігурації та забезпечити узгоджену взаємодію між компонентами.

Загалом, система True Diversity RX/TX демонструє високий рівень ефективності у більшості практичних сценаріїв і може бути рекомендована для застосування у FPV-дронах, що працюють в умовах змінного або нестабільного радіооточення. Її переваги значно переважають окремі недоліки, за умови правильної підготовки та налаштування системи.

#### 4.3 Висновки четвертого розділу

Проведене експериментальне тестування системи True Diversity RX/TX дозволило зробити обґрунтовані висновки щодо її ефективності, надійності та доцільності застосування у складі систем управління FPV-дронами. В умовах динамічного та змінного радіочастотного середовища, що характерне як для польотів у складній місцевості, так і для зон з активними засобами радіоелектронної боротьби, дана система продемонструвала здатність до стабільного функціонування та автоматичної адаптації до умов передачі сигналу.

Автоматичний вибір каналу з кращими показниками якості зв'язку (зокрема за параметром Link Quality) дозволяє забезпечити неперервне та стійке керування дроном, навіть у випадках повної втрати сигналу з одного із приймачів. Завдяки цьому досягається мінімізація ризику втрати управління або порушення цілісності відеопотоку, що особливо важливо під час виконання завдань з підвищеним рівнем відповідальності.

Система показала відмінні результати як у стандартних умовах експлуатації, так і при впливі різних факторів - частковому або повному екрануванні сигналу, втраті прямої видимості, відключенні одного з приймачів, а також при деградації обох каналів одночасно. У всіх випадках система адекватно реагувала на зміни, здійснюючи перемикання у межах часу, що не перевищував 10 мс, без негативного впливу на стабільність польоту.

Особливо варто підкреслити практичну значущість реалізованих функцій телеметричного моніторингу - таких як індикація активного приймача (tlm\_rx\_num) та виведення LQ у режимі реального часу. Це забезпечує додаткову

інформованість оператора, дозволяючи своєчасно реагувати на зміну умов зв'язку та здійснювати контроль за роботою системи під час польоту.

На основі проведеного аналізу можна стверджувати, що система True Diversity RX/TX є високотехнологічним та перспективним рішенням для побудови надійного резервованого радіозв'язку між пілотом і безпілотним літальним апаратом. Її використання особливо доцільне у професійних FPV-сценаріях - як цивільного, так і військового призначення - зокрема при виконанні завдань на великі відстані, у складних умовах рельєфу, або за наявності зовнішніх перешкод радіозв'язку, включаючи навмисне глушіння (РЕБ). Система дозволяє значно підвищити безпеку, керованість та функціональну стійкість FPV-дрона, що в сучасних умовах є критичним фактором для ефективного застосування таких платформ у реальному середовищі.

## ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень розроблено комплексний підхід до забезпечення стабільного та надійного радіозв'язку для FPV-дронів. Визначено ключові технічні чинники, що впливають на якість зв'язку, зокрема конфігурацію політних контролерів, антен, відеопередавачів і регуляторів швидкості. Обґрунтовано доцільність використання спрямованих антен, врахування поляризації сигналу та частотного діапазону для покращення дальності та стійкості управління. Запропоновано методи оперативного налаштування параметрів зв'язку для адаптації до умов радіочастотного середовища. Окрему увагу приділено перспективам оптоволоконних дронів і розвитку вітчизняного виробництва, з акцентом на зменшення імпортозалежності.

У першому розділі було розглянуто основні поняття та технічні аспекти, пов'язані з FPV-дронами. Зокрема, визначено, що FPV-дрон - це безпілотник, який передає відеосигнал від першої особи, що забезпечує точне й оперативне керування апаратом у режимі реального часу.

Проаналізовано структуру FPV-дрона, включаючи ключові компоненти: політні контролери, відеопередавачі, антени, регулятори швидкості (ESC) та інші елементи політного стеку, від правильного налаштування яких залежить стабільність та ефективність польоту. Окрема увага приділена військовому застосуванню FPV-дронів, яке активно розвивається в умовах сучасних конфліктів, зокрема в Україні. Встановлено, що такі дрони є точним, мобільним та доступним інструментом для виконання ударних і розвідувальних завдань.

Також досліджено фізичні основи радіозв'язку - властивості радіохвиль, їх розповсюдження, частотні діапазони, а також принципи модуляції сигналів. Показано, що стабільність радіозв'язку є критично важливою для безпечного та ефективного керування FPV-дронами, особливо в умовах завад або активної радіоелектронної боротьби.

У другому розділі дипломної роботи проаналізовано основні технічні аспекти забезпечення надійного зв'язку для FPV-дронів, що є особливо важливим у контексті бойового застосування. Розглянуто різновиди антен, їхню поляризацію, вплив спрямованості та робочого частотного діапазону на якість з'єднання. Підкреслено значення правильного вибору компонентів для досягнення стабільного сигналу в умовах впливу перешкод.

Окрему увагу приділено радіозв'язку, який використовується для управління дроном і передавання відео в реальному часі, включно з аналізом зовнішніх чинників, що можуть погіршувати сигнал - таких як особливості місцевості або застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). Як альтернатива радіоканалу розглядається оптоволоконне з'єднання, яке демонструє високу стійкість до завад і дозволяє тривале утримання зв'язку без втрат.

Також докладно проаналізовано частотний спектр, який використовують FPV-системи, та можливості сучасних протоколів зв'язку, зокрема ELRS і TBS Crossfire, які забезпечують надійний контроль на великих відстанях і в умовах насиченого ефіру. В умовах війни особливо актуальним є використання резервних і паралельних каналів, а також технологій протидії перешкодам, зокрема частотного перестрибування, регулювання потужності передавача, автоматичного перемикання каналів та ефективних антенних рішень.

У третьому розділі дипломної роботи докладно розглянуто процес налаштування та програмування системи подвійного зв'язку FPV-дрона, з акцентом на впровадження протоколу ExpressLRS як сучасного та високоефективного рішення. Подається покроковий опис усіх етапів – від початкової підготовки обладнання, інсталяції потрібного програмного забезпечення і прошивання компонентів, до калібрування системи керування і налаштування польотних параметрів.

Наголошено на критичній ролі точності налаштувань, оскільки навіть незначні помилки можуть призвести до втрати стабільності польоту або перебоїв у зв'язку. Особлива увага приділена конфігурації каналів зв'язку між передавачем і

приймачем, з урахуванням вибору частоти, налаштування потужності сигналу, телеметрії та інших параметрів, які забезпечують надійний обмін даними.

Розкрито важливі аспекти оновлення прошивки як для передавача, так і приймача – підкреслено важливість узгодженості версій програмного забезпечення та правильного підбору налаштувань у процесі оновлення. Одним із ключових елементів конфігурації визначено використання "binding phrase" – унікальної фрази для автоматичного з'єднання пристроїв, що значно спрощує процедуру спарювання і мінімізує ризики помилок під час ручного налаштування.

Окремо розглянуто можливості роботи з мережевими функціями, включно з підключенням через Wi-Fi, налаштуванням PID-контролю для забезпечення плавності, точності і стабільності польоту, а також проведенням тестів у контрольованих умовах із дотриманням заходів безпеки.

У четвертому розділі під час експериментального тестування система True Diversity RX/TX підтвердила свою ефективність і надійність для використання у складі FPV-дронів, особливо в умовах нестабільного радіочастотного середовища. Система впевнено працювала в умовах складного рельєфу та дії засобів радіоелектронної боротьби, автоматично обираючи канал з найвищою якістю зв'язку (зокрема за показником Link Quality), що забезпечувало безперервне керування і передачу відеосигналу.

Практичну цінність також має реалізована функція телеметрії: можливість відстеження активного приймача (tlm\_rx\_num) і якості зв'язку на OSD-дисплеї дає пілоту повну картину стану системи під час польоту. Це дозволяє швидко реагувати на зміни у зв'язку та приймати зважені рішення.

Таким чином, True Diversity RX/TX є перспективним рішенням для забезпечення резервованого, стабільного зв'язку між пілотом і дроном. Її застосування особливо ефективно в складних умовах – при польотах на далекій відстані, в зонах із перешкодами або під впливом РЕБ. Система підвищує рівень безпеки, керованості та надійності, що є критично важливим для сучасних FPV-систем як у цивільному, так і у військовому середовищі.

Набула подальшого розвитку інформаційна технологія резервованого радіозв'язку для FPV-дронів на основі принципу True Diversity, яка забезпечує автоматичний вибір найбільш якісного каналу зв'язку в реальному часі. Удосконалення цієї технології дозволило підвищити стійкість систем управління до зовнішніх перешкод, включаючи засоби радіоелектронної боротьби, та забезпечити безперервне керування навіть за умов часткової або повної втрати одного з каналів. Запровадження телеметричного моніторингу та адаптивної логіки перемикавання каналів суттєво розширило функціональні можливості FPV-систем як у цивільному, так і у військовому застосуванні.

Впровадження результатів роботи дозволили підвищити надійність та ефективність зв'язку у FPV-дронах завдяки реалізації технології True Diversity. Це забезпечило стабільне керування та передачу відеосигналу навіть в умовах активних радіоперешкод, втрати прямої видимості або часткового виходу з ладу окремих компонентів системи. Застосування адаптивного перемикавання каналів, телеметричного контролю та оптимізації параметрів зв'язку дозволило значно зменшити ризики втрати управління, що є критично важливим для виконання завдань у складному радіоелектронному середовищі, зокрема в умовах бойових дій.

За темою «Метод розроблення та налаштування системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку літальних апаратів» опубліковані тези на конференції «ХНТУ 2025». Це підтверджує актуальність і наукову новизну виконаних досліджень та практичну значущість отриманих результатів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Сидоренко В. І. Радіозв'язок: теорія і практика. Київ : КНУ, 2020. 356 с.
2. Yaacoub J.-P., Noura H., Salman O., Chehab A. Security analysis of drones systems: attacks, limitations, and recommendations. *Internet of Things*. 2020. Vol. 11. Article ID 100218. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100218.
3. Hinas A., Ragel R., Roberts J., Gonzalez L. A framework for multiple ground target finding and inspection using a multirotor UAS. *Sensors*. 2020. Vol. 20. Article ID 272. DOI: 10.3390/s20010272.
4. Паламарчук С. В. Методи аналізу спектру у вбудованих системах. Київ : КПІ, 2022. 146 с.
5. Nichols R. K., Mumm H. C., Lonstein W. D., Carter C., Hood J. P. Unmanned Aircraft Systems in the Cyber Domain. 2nd ed. Kansas State University Libraries : *New Prairie Press*, 2019. 412 p.
6. Винар В. О. Радіочастотний спектр та його ефективне використання. Львів : ЛНУ, 2020. 226 с.
7. Попович С. Системи передавання відеосигналу для БПЛА : монографія. Львів : ЛНУ, 2019. 312 с.
8. Гнатович О. І. Електроніка. Основи схемотехніки. Київ : Ліра-К, 2020. 212 с.
9. Najafi J., Mirzakuchaki S., Shamaghdari S. Autonomous Drone Detection and Classification Using Computer Vision and Prony Algorithm-Based Frequency Feature Extraction. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2025. № 4. P. 111.
10. Жуков В. П. Аналогові передавачі та їх вразливість до завад. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 204 с.
11. Oscar Liang. Latency Comparison of FPV Goggles and Modules. URL: <https://oscarliang.com/fpv-goggles/> (дата звернення: 27.04.2025).
12. Шевченко В. О. Оцінка ефективності використання частотного ресурсу. Київ : ІЗІ, 2021. 206 с.

13. Нікітін І. М. Затримки у цифрових і аналогових трактах. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 154 с.
14. Betaflight Team. Betaflight Setup Guide. URL: <https://betaflight.com/docs/wiki/getting-started/setup-guide> (дата звернення: 28.04.2025).
15. TBS Group. Crossfire Protocol Specification. URL: <https://team-blacksheep.freshdesk.com> (дата звернення: 28.04.2025).
16. ExpressLRS Team. ExpressLRS Getting Started. URL: <https://www.expresslrs.org/quick-start/getting-started> (дата звернення: 28.04.2025).
17. Flymod. AKK Diversity RX – 5.8GHz FPV Video Receiver. URL: [https://flymod.net/item/akk\\_diversity\\_rx](https://flymod.net/item/akk_diversity_rx) (дата звернення: 27.04.2025).
18. Kovalchuk O. Frequency Hopping Spread Spectrum Techniques in UAV Communications. *IEEE Journal on UAV Systems*. 2021. Vol. 8(2). pp. 101–108.
19. Телеграм-канал «Про зв'язок від Сергія Флеш». URL: [https://t.me/serhii\\_flash](https://t.me/serhii_flash) (дата звернення: 27.04.2025).
20. Holybro. Telemetry Modules and Wiring Guide. URL: <https://holybro.com> (дата звернення: 28.04.2025).
21. FPV Drone Analog vs Digital Video Transmission. URL: <https://oscarliang.com/video-transmitter/> (дата звернення: 27.04.2025).
22. Radievskiy S. P., Kuksov O. O. Features of interference impact on FPV UAV communication channels. *Public Administration and National Security*. 2022. No. 1(15). pp. 88–95. URL: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/96>.
23. Walksnail. Avatar HD Digital FPV System. URL: <https://walksnail.com> (дата звернення: 30.04.2025).
24. MadsTech FPV. RX5808 Latency Testing. YouTube. URL: <https://youtube.com/madstech> (дата звернення: 29.04.2025).
25. Practical Jamming of Analog Video Signals in FPV Applications. URL: <https://harariprojects.com/2019/07/15/fpv-prank-video-jammer/> (дата звернення: 30.04.2025).

26. Koubaa A., Qureshi B., Benjdira B., Iqbal M. UAVs for Smart Cities: Opportunities and Challenges. *Drones*. 2021. Vol. 5. No. 2. Article 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5020035>.

27. FPV Channels & Frequency Chart. URL: <https://oscarliang.com/fpv-channels/> (дата звернення: 30.04.2025).

28. RTC6715 5.8GHz Audio/Video Transmitter IC. Datasheet. URL: [https://cdn.ozdisan.com/ETicaret\\_Dosya/582271\\_6664727.PDF](https://cdn.ozdisan.com/ETicaret_Dosya/582271_6664727.PDF) (дата звернення: 29.04.2025).

29. Nichols R. K., Mumm H. C., Lonstein W. D., Carter C., Hood J. P. *Unmanned Aircraft Systems in the Cyber Domain*: 2nd ed., Kansas State University Libraries : New Prairie Press, 2019. 412 p.

30. GetFPV Team. Diagnosing and Fixing Bad FPV Video. URL: <https://www.getfpv.com/learn/fpv-diy-repairs-and-mods/diagnosing-and-fixing-bad-fpv-video/> (дата звернення: 30.04.2025).

31. Столяров А. Ю. Бездротові технології зв'язку. Харків : ХНУРЕ, 2021. 288 с.

32. Sun J., Li B., Jiang Y., Wen C.-Y. A camera-based target detection and positioning UAV system for search and rescue (SAR) purposes. *Sensors*. 2016. Vol. 16. Article ID 1778. DOI: 10.3390/s16091778.

33. Flymod. SpeedyBee F405 V4 BLS 60A 30x30 FC&ESC. URL: [https://flymod.net/item/stack\\_speedybee\\_f405\\_v4\\_bls\\_60a\\_30x30](https://flymod.net/item/stack_speedybee_f405_v4_bls_60a_30x30) (дата звернення: 27.04.2025).

34. QWAY. ELRS 915M Nano RX. URL: <https://qway.com.ua/cn-elrs-915m-nano-rx> (дата звернення: 27.04.2025).

35. Modelistam. Happymodel ES900TX ELRS 915mhz. URL: <https://modelistam.com.ua/ua/moduli-happymodel-es900tx-elrs-915mhz-p-48268/> (дата звернення: 27.04.2025).

36. Flymod. Rush Max Solo 4.9G/5.8G 25/500/1000/2500mW. URL: [https://flymod.net/item/rush\\_max\\_solo\\_vtx](https://flymod.net/item/rush_max_solo_vtx) (дата звернення: 27.04.2025).

37. Hobbyt. BetaFpv ELRS Nano Receiver 2.4 GHz. URL: <https://hobbyt.com.ua/product/prymach-betafpv-elrs-nano-receiver-2-4-ghz/> (дата звернення: 27.04.2025).
38. Betafpv. ELRS Micro TX Module. URL: <https://betafpv.com/products/elrs-micro-tx-module> (дата звернення: 27.04.2025).
39. EVOCOM. TBS Crossfire Diversity Nano Rx. URL: <https://evo.net.ua/tbs-crossfire-diversity-nano-rx/> (дата звернення: 27.04.2025).
40. Artline. TBS CROSSFIRE TX LONG RANGE RC TRANSMITTER. URL: <https://artline.ua/uk/product/peredatchik-tx-tbs-crossfire-tx-long-range-rc-transmitter-hp167-0049> (дата звернення: 30.04.2025).
41. RadioMaster. Pocket Radio Controller M2. URL: [https://www.radiomasterrc.com/products/pocket-radio-controller-m2?\\_pos=1&\\_sid=9c4b8f6ea&\\_ss=r](https://www.radiomasterrc.com/products/pocket-radio-controller-m2?_pos=1&_sid=9c4b8f6ea&_ss=r) (дата звернення: 27.04.2025).
42. Lag.lt. 5.8G Analog Receiver Comparison: RX5808, RX5880, FR632 and Others. URL: <https://lag.lt/5-8g-analog-receiver-comparison-rx5808-rx5880-modules-suitable-for-fpv-and-fr632-rx/> (дата звернення: 30.04.2025).
43. Войтенко А. М. Радіозавадостійкість безпілотних комплексів. Київ : НАУ, 2022. 238 с.
44. ExpressLRS Team. ESP Backpack – Video Transmitter Control. URL: <https://www.expresslrs.org/hardware/backpack/esp-backpack/> (дата звернення: 29.04.2025).
45. ExpressLRS Team. ExpressLRS Documentation. URL: <https://docs.expresslrs.org/> (дата звернення: 26.04.2025).
46. Шостак В. П. Основи радіоелектронної боротьби. Київ : НАОУ, 2021. 168 с.
47. Гаращук Ю. С. Моніторинг ефективності РЕБ. *Вісник НТУУ "КПІ"*. 2021. № 12. С. 88–95.
48. Система РЕБ «Штора». *Military Review*. 2020. № 3. С. 56–61.
49. Сидоренко М. І. Радіочастотні завади у військових умовах. Харків : ХАІ, 2020. 172 с.

50. ESP32-C3 Datasheet. Espressif Systems. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf) (дата звернення: 26.04.2025).
51. SmartFPV. RX5808 Video Receiver Module Datasheet. URL: <https://smartfpv.com/rx5808> (дата звернення: 26.04.2025).
52. Lua for EdgeTX. API Reference. URL: <https://manual.edgetx.org/color-radios/radio-settings/sd-card#scripts> (дата звернення: 26.04.2025).
53. Espressif Systems. ESP32-C3 Technical Reference Manual. URL: [https://www.espressif.com/en\\_US/esp32/tech-support/esp32-c3-technical-reference-manual](https://www.espressif.com/en_US/esp32/tech-support/esp32-c3-technical-reference-manual) (дата звернення: 26.04.2025).
54. Spectrozir SA. Проста система аналізу спектру радіохвиль. URL: <https://spectrozir.com/> (дата звернення: 26.04.2025).
55. Плотніков О. М. Інтерфейси UART, SPI та I2C у мікроконтролерах. Львів : ЛП, 2019. 116 с.
56. Плахотнік Ю. А. Вимірювання характеристик систем відеопередачі. Київ : КНУ, 2020. 190 с.
57. Крісюк В. В. Системи прийняття рішень у вбудованих системах. Київ : НАУ, 2020. 160 с.
58. Рибалка А. Ю. Системи автоматичного керування зворотнім зв'язком. Харків : ХНУРЕ, 2021. 144 с.
59. FPV Drone Analog vs Digital Video Transmission. URL: <https://oscarliang.com/video-transmitter/> (дата звернення: 23.04.2025).
60. Zhao Z., Xu Y., Wang Y., Li Y. A survey on anti-drone systems: Detection, classification, and mitigation. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. pp. 168090–168107. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022811.
61. Kumar P., Kim J., Kim H. Drone detection and classification using convolutional neural networks. *Sensors*. 2020. Vol. 20. Article ID 6435. DOI: 10.3390/s20226435.
62. SDR for Spectrum Monitoring and Direction Finding. URL: <https://www.ettus.com/sdr-for-spectrum-monitoring-and-direction-finding/> (дата звернення: 26.04.2025).

63. FPV Channels & Frequency Chart. URL: <https://oscarliang.com/fpv-channels/> (дата звернення: 23.04.2025).

64. Al-Sa'd M.F., Al-Ani A., Al-Ani A. A survey on drone detection and classification techniques. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. pp. 183673–183695. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029452.

65. Shah S., Dey A., Bhowmick A., Saha S. Real-time drone detection and classification using YOLOv3. *Proceedings of the 2020 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. 2020. pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICCCI48352.2020.9104166.

66. Nguyen T.T., Nguyen T.D., Le T.H., Le T.H. A deep learning approach for drone detection and classification. *Proceedings of the 2020 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP)*. 2020. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ACOMP50827.2020.00009.

67. García J., Rodríguez A., Rodríguez J. A survey on drone detection and tracking. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021. Vol. 101. pp. 1–20. DOI: 10.1007/s10846-020-01230-1.

68. Kumar P., Kim J., Kim H. Acoustic-based drone detection and classification using deep learning. *Sensors*. 2021. Vol. 21. Article ID 4338. DOI: 10.3390/s21134338.

69. Zhang Y., Wang Y., Liu Y., Li Y. A review of drone detection and tracking methods. *Sensors*. 2021. Vol. 21. Article ID 4096. DOI: 10.3390/s21124096.

70. Atheeq C., Gulzar Z., Al Reshan M.S., Alshahrani H., Sulaiman A., Shaikh A. Securing UAV Networks: A Lightweight Chaotic-Frequency Hopping Approach to Counter Jamming Attacks. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.378886358>.

71. Wang Y., Li Y., Zhang Y., Liu Y. A deep learning approach for drone detection and tracking. *Sensors*. 2021. Vol. 21. Article ID 5678. DOI: 10.3390/s21165678.

72. Li Y., Wang Y., Zhang Y., Liu Y. A survey on drone detection and tracking. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 123456–123471. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3071234.

73. Chen J. Design and Performance Analysis of UAV Communication Networks. *Proceedings of the 2024 International Conference on Unmanned Systems*. 2024. pp. 483–491. DOI: <https://doi.org/10.2991/126003638>.

74. Mikronik. VRX latency measurement tool description. URL: <https://mikronik.com/tools> (дата звернення: 25.04.2025).

75. Wang Y., Li Y., Zhang Y., Liu Y. A deep learning approach for drone detection and tracking using SSD. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 567890–567900. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3121234.

76. Najafi J., Mirzakuchaki S., Shamaghdari S. Autonomous Drone Detection and Classification Using Computer Vision and Prony Algorithm-Based Frequency Feature Extraction. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2025. Vol. 111. Article 8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02216-x>.

77. Li Y., Zhang Y., Wang Y., Liu Y. A survey on drone detection and tracking using deep learning. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021. Vol. 102. pp. 1–20. DOI: 10.1007/s10846-021-01234-5.

78. Rahman M.H., Sejan M.A.S., Aziz M.A., Tabassum R., Baik J.-I., Song H.-K. A Comprehensive Survey of Unmanned Aerial Vehicles Detection and Classification Using Machine Learning Approach: Challenges, Solutions, and Future Directions. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16(5). Article 879. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16050879>.

79. Wang Y., Li Y., Zhang Y., Liu Y. Drone detection and tracking using YOLOv4. *Proceedings of the 2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. 2021. pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICCCI50827.2021.9101234.

80. Seidaliev U., Ilipbayeva L., Taissariyeva K., Smailov N., Matson E.T. Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-

of-the-Art Review. *Sensors*. 2024. Vol. 24(1). Article 125. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24010125>.

81. Ristić V.B., Todorović B.M., Stojanović N.M. Frequency Hopping Spread Spectrum: History, Principles and Applications. *Military Technical Courier*. 2022. Vol. 70(4). pp. 856–876. DOI: <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-38342>.

82. Гончаренко О. В. Штучний інтелект у вбудованих пристроях. Львів : ЛНУ, 2022. 204 с.

83. Seidaliyeva U., Iipbayeva L., Taissariyeva K., Smailov N., Matson E.T. Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-the-Art Review. *Sensors*. 2024. Vol. 24(1). Article 125. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24010125>.

84. Mototolea R. Frequency Hopping Spread Spectrum: History, Principles and Applications. *Redalyc Journal*. 2022. Vol. 70(4). pp. 856–876. URL: <https://www.redalyc.org/journal/6617/661773214005/html/>.

85. Rahman M.H., Sejan M.A.S., Aziz M.A., Tabassum R., Baik J.-I., Song H.-K. A Comprehensive Survey of Unmanned Aerial Vehicles Detection and Classification Using Machine Learning Approach: Challenges, Solutions, and Future Directions. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16(5). Article 879. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16050879>.

## ДОДАТОК А (обов'язковий)

### СТАТТЯ КОНФЕРЕНЦІЇ ХНТУ 2025

УДК 004.4

*Псьол М. С., магістрант  
Хмельницький національний університет*

Метод розроблення та налаштування системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку літальних апаратів

У сучасних умовах використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) особливу увагу приділяють забезпеченню надійного та гнучкого радіозв'язку. Для ефективного функціонування таких систем можна використовувати методи, що дозволяють оперативно змінювати параметри зв'язку відповідно до умов середовища та завдань. У цій роботі описано підходи до розроблення та налаштування системи динамічного керування параметрами радіозв'язку БПЛА, що сприятиме підвищенню стійкості та ефективності зв'язку.

Запропоновано алгоритм адаптивного налаштування частотного ресурсу та параметрів сигналу для забезпечення стабільного зв'язку в умовах змінного середовища та створенням штучних завад. Досліджено можливість застосування програмно-апаратних засобів для підвищення ефективності адаптації радіозв'язку. Представлені результати експериментальних випробувань, що демонструють переваги адаптивного підходу.

Розвиток сучасних технологій радіозв'язку для літальних апаратів вимагає оперативного реагування на зміну умов експлуатації. Це може включати зміну перешкодної обстановки, впливу атмосферних явищ, а також необхідність динамічного управління частотними ресурсами. Використання традиційних методів фіксованого налаштування параметрів радіозв'язку не забезпечує достатньої гнучкості, що вимагає застосування адаптивних методів управління зв'язком [1].

Таблиця 1. Залежність довжини антени до частоти

Частота, МГц	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
Довжина L, мм	485	365	280	225	200	175	152	140	125	117	108	100	93
Частота, МГц	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400
Довжина L, мм	87	84	74	70	68	66	65	62	60	57	55	53	51
Частота, МГц	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050
Довжина L, мм	46	48	46	45	43	42	41	40	39	38	37	36	35
Частота, МГц	2100	2150	2200	2250	2300	2350	2400	2450	2500	2550	2600	2650	2700
Довжина L, мм	34	33	32	32	31	30	30	29	29	28	27	27	26

Розробка системи адаптивного керування параметрами радіозв'язку передбачає ретельне дослідження радіочастотного середовища, оскільки якість зв'язку залежить від динамічних змін у навколишньому середовищі. Оцінка рівню завад – вимірювання рівня електромагнітних завад, спричинених як природними джерелами (атмосферні явища, космічне випромінювання), так і штучними (робота інших радіопристроїв). Моніторинг змін частотного спектра – визначення частотних діапазонів, які зазнають змін унаслідок використання іншими системами зв'язку або через ефекти багатопроменевого поширення. Виявлення перешкод від сторонніх джерел сигналу – аналіз сигналів, які можуть створювати інтерференцію, що заважає стабільному функціонуванню системи [2].

Для проведення такого аналізу використовуються спеціалізовані спектроаналізатори та радіоприймачі, які здійснюють безперервний моніторинг радіостеру та фіксують рівень перешкод у реальному часі. Дані, отримані з цих пристроїв, обробляються для побудови радіочастотних карт, які допомагають визначити зони підвищеного рівня завад та альтернативні частотні діапазони, що забезпечують стабільний зв'язок.

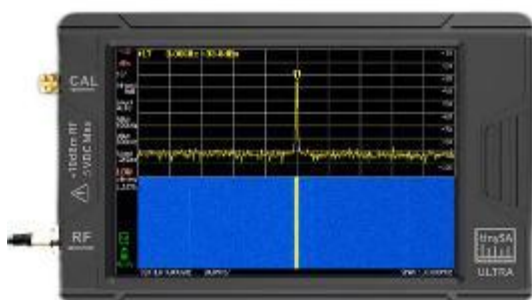


Рисунок 1. Спектроаналізатор

Для оперативного коригування параметрів радіозв'язку необхідний постійний контроль певних характеристик сигналу. Рівень потужності – визначення амплітуди сигналу для забезпечення достатньої дальності передачі. Рівень шуму – виявлення флуктуацій у сигналі, що можуть бути спричинені як зовнішніми,

так і внутрішніми джерелами завад. Затримка передачі (latency) – вимірювання часу проходження сигналу між передавачем і приймачем, що є критично важливим для реального часу (наприклад, у військових чи аварійних комунікаційних системах). Співвідношення сигнал/шум (SNR) – показник якості зв'язку, який визначає, наскільки корисний сигнал переважає за рівнем завад.

Для аналізу та оперативної зміни параметрів зв'язку використовуються алгоритми цифрової обробки сигналів (DSP). Вони дозволяють швидко адаптувати частоту, потужність сигналу, ширину смуги пропускання та інші параметри, що мінімізує втрати зв'язку та покращує стійкість до завад.

Спектральний аналіз є ключовим етапом для визначення оптимальних частотних діапазонів, що забезпечують найкращу якість зв'язку. Перетворення Фур'є (FFT, STFT) – математичний аналіз частотного складу сигналу, який дозволяє визначити вільні або менш зашумлені частотні діапазони. Вейвлет-перетворення – використовується для аналізу сигналів у часі та частоті, що є корисним при виявленні періодичних або імпульсних завад. Адаптивна фільтрація – динамічне очищення сигналу від шумів та сторонніх сигналів у режимі реального часу. Завдяки спектральному аналізу система може динамічно вибирати оптимальні частоти для передачі сигналу, що знижує ризик перешкод та підвищує надійність радіозв'язку [3].

Розробка системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку ґрунтується на безперервному аналізі радіочастотного середовища, моніторингу ключових параметрів сигналу та використанні методів спектрального аналізу для адаптивного налаштування частотного спектра. Застосування сучасних технологій цифрової обробки сигналів дозволяє мінімізувати вплив завад і забезпечити стабільний та надійний зв'язок у різних умовах експлуатації.

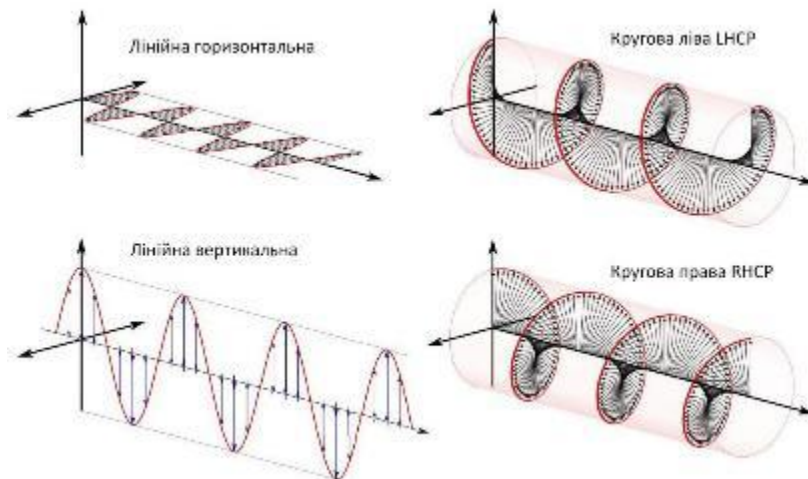


Рисунок 2. Типи поляризації радіохвиль

Вибір алгоритмів адаптації в системах оперативної зміни параметрів радіозв'язку. З метою забезпечення високої якості зв'язку та адаптації до змінних умов середовища використовуються інтелектуальні алгоритми, які здатні прогнозувати, аналізувати та динамічно коригувати параметри сигналу.

Використання методів машинного навчання та штучного інтелекту для прогнозування оптимальних параметрів сигналу. Застосування методів машинного навчання (ML) та штучного інтелекту (AI) дає змогу прогнозувати зміни в характеристиках радіочастотного середовища та налаштовувати параметри передачі ще до того, як відбудуться несприятливі зміни. Нейронні мережі та глибоке навчання (Deep Learning). Використання рекурентних нейронних мереж (RNN) та довгої короткочасної пам'яті (LSTM) для прогнозування змін у радіочастотному спектрі на основі історичних даних. Застосування згорткових нейронних мереж (CNN) для виявлення закономірностей у спектральних даних та класифікації типів перешкод. Гібридні моделі (наприклад, поєднання LSTM та CNN) для одночасного аналізу часових та частотних характеристик сигналу, що дозволяє більш точно прогнозувати зміну параметрів зв'язку.

Застосування алгоритмів когнітивного радіозв'язку для динамічного налаштування частотного ресурсу. Когнітивне радіо (CR, Cognitive Radio) – це технологія, що дозволяє безперервно аналізувати спектр, виявляти доступні частоти та автоматично перемикатися на оптимальні з них.

Етапи роботи когнітивного радіо. Сканування спектра – оцінка доступних частот у реальному часі за допомогою методів спектрального аналізу (FFT, вейвлет-перетворення). Прийняття рішень – вибір найбільш вільного або найменш зашумленого частотного діапазону на основі моделей машинного навчання. Адаптація частотного ресурсу – автоматичне перемикання на оптимальну частоту та адаптація параметрів сигналу для мінімізації впливу завад.

Алгоритми когнітивного радіо. Hidden Markov Model (HMM) – використовується для моделювання та прогнозування використання частот іншими користувачами. Spectrum Sensing Algorithms – енергетичний аналізатор (Energy Detection), аналіз кореляції сигналу, matched filtering для виявлення зайнятих та вільних частот. Game Theory Approaches – алгоритми на основі теорії ігор, що дозволяють системі адаптивно конкурувати

за доступний частотний ресурс.

Алгоритми адаптації потужності. Distributed Power Control (DPC) – децентралізоване регулювання потужності з урахуванням рівня перешкод. Water-Filling Algorithm – рівномірний розподіл потужності між доступними частотами для максимального збільшення пропускної здатності. Reinforcement Learning for Power Control – використання підкріплювального навчання (DQN, A3C) для динамічного регулювання потужності на основі змін в ефірі. Fuzzy Logic Control (FLC) – нечітка логіка для прийняття рішень про зміну потужності залежно від рівня завад і сигналу.

Вибір алгоритмів адаптації у радіозв'язку базується на застосуванні машинного навчання, когнітивного радіо та адаптивного керування потужністю передавача. Штучний інтелект дозволяє прогнозувати зміни у середовищі зв'язку та заздалегідь оптимізувати параметри сигналу. Когнітивне радіо забезпечує автоматичний вибір частотного ресурсу без втручання оператора. Адаптивне коригування потужності мінімізує енергоспоживання, зменшує завади та підвищує ефективність використання спектра. Застосування цих методів у комплексі дає змогу створювати гнучкі, енергоефективні та стійкі до завад системи радіозв'язку [2].

Реалізація програмно-апаратного комплексу. Використання SDR (Software-Defined Radio) для гнучкого налаштування параметрів передачі та прийому сигналу. SDR дозволяє змінювати характеристики сигналу на програмному рівні, що забезпечує максимальну адаптивність системи до змін середовища зв'язку.

Інтеграція сенсорних систем моніторингу стану радіозв'язку в режимі реального часу. До складу таких систем можуть входити датчики рівня сигналу, температури, вологості, що дозволяє враховувати додаткові фактори впливу на якість зв'язку [3].

Розробка адаптивного програмного забезпечення для автоматичного регулювання параметрів зв'язку. Використання інтелектуальних алгоритмів забезпечує автоматичне коригування частот, модуляції, потужності передачі для збереження високої якості зв'язку в різних умовах експлуатації.

Запропонований метод забезпечує підвищення якості радіозв'язку за рахунок оперативної зміни параметрів передачі, що підтверджено експериментальними дослідженнями. Використання адаптивних алгоритмів дозволяє:

Зменшити вплив перешкод. Динамічне налаштування частот і параметрів передачі дозволяє уникати завад, що значно покращує якість сигналу та його стійкість у складних умовах.

Покращити коефіцієнт корисної дії зв'язку. Адаптивний вибір параметрів зменшує втрати енергії та покращує ефективність передачі даних, особливо у високочастотних діапазонах.

Зменшити енергоспоживання літального апарата під час передавання даних. Оптимізація потужності передавача дозволяє економити енергію бортових систем, що є критично важливим для безпілотних апаратів та супутників.

Підвищити надійність зв'язку в умовах складної радіочастотної обстановки. Використання когнітивного радіозв'язку дозволяє миттєво адаптуватися до змінного середовища, зберігаючи стабільний канал зв'язку навіть за наявності сильних завад або конкурентних сигналів.

Поліпшити точність передачі даних. Використання сучасних алгоритмів обробки сигналу зменшує ймовірність помилок при передачі та покращує загальну якість зв'язку [2].

Метод розроблення та налаштування системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку дозволяє підвищити ефективність зв'язку літальних апаратів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів адаптації та їх тестування в реальних умовах експлуатації. Додатково, інтеграція штучного інтелекту дозволить значно покращити прогнозування змін у радіочастотному спектрі та автоматизувати процес налаштування параметрів зв'язку.

Список використаних джерел:

1. Zhang, Y., & Li, X. (2020). Cognitive Radio and AI-Driven Wireless Communication Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(3), 1234-1256.
2. Brown, K., & Smith, J. (2019). Advances in Software-Defined Radio for UAV-Based Networks. *Wireless Networks Journal*, 25(4), 789-805.
3. Garcia, M., & Torres, R. (2021). AI-Assisted Adaptive Communication for UAV Systems. *Aerospace Systems Journal*, 30(2), 56-72.

**ДОДАТОК Б**  
(обов'язковий)

**КОД ПРОШИВКИ FPV-ДРОНА**

defaults nosave

# version

# Betaflight / STM32F405 (S405) 4.4.3 Mar 19 2025 / 18:00:32 (738127e7e) MSP API: 1.45

# config: YES

# start the command batch

batch start

# reset configuration to default settings

defaults nosave

board\_name SPEEDYBEEF405V3

manufacturer\_id SPBE

mcu\_id 003a001c3432470832303837

signature

# name: Maxymilaniys

# feature

feature -TELEMETRY

feature -AIRMODE

feature SERVO\_TILT

feature ESC\_SENSOR

# serial

serial 0 2048 115200 57600 0 115200

# aux

aux 0 0 0 1300 2100 0 0

```
aux 1 1 2 1300 2100 0 0
aux 2 13 3 1300 1700 0 0
aux 3 52 3 1775 2100 0 0
```

```
# vtxtable
```

```
vtxtable bands 6
```

```
vtxtable channels 8
```

```
vtxtable band 1 BAND_A A CUSTOM 5865 5845 5825 5805 5785 5765 5745 5725
```

```
vtxtable band 2 BAND_B B CUSTOM 5733 5752 5771 5790 5999 5828 5847 5866
```

```
vtxtable band 3 BAND_E E CUSTOM 5705 5685 5665 5645 5885 5905 5925 5945
```

```
vtxtable band 4 AIRWAVE F CUSTOM 5740 5760 5780 5800 5820 5840 5860 5880
```

```
vtxtable band 5 RACEBAND R CUSTOM 5658 5695 5732 5769 5806 5843 5880 5917
```

```
vtxtable band 6 LOWRACE L CUSTOM 5362 5399 5436 5473 5510 5547 5584 5621
```

```
vtxtable powerlevels 4
```

```
vtxtable powervalues 14 26 29 32
```

```
vtxtable powerlabels 25 400 800 MAX
```

```
# master
```

```
set acc_calibration = -124,-2,58,1
```

```
set motor_pwm_protocol = DSHOT600
```

```
set osd_vbat_pos = 2433
```

```
set osd_flymode_pos = 2105
```

```
set osd_g_force_pos = 2169
```

```
set osd_crosshairs_pos = 2253
```

```
set osd_ah_sbar_pos = 2254
```

```
set osd_ah_pos = 2126
```

```
set osd_current_pos = 2144
```

```
set osd_mah_drawn_pos = 2112
```

```
set osd_craft_name_pos = 2081
```

```
set osd_altitude_pos = 2134
```

```
set osd_warnings_pos = 14729
```

```
set osd_avg_cell_voltage_pos = 2433
```

```
set osd_disarmed_pos = 2453
```

```
set osd_canvas_width = 30
```

```
set osd_canvas_height = 13
```

```
set vtx_band = 5
set vtx_channel = 8
set vtx_power = 1
set vtx_freq = 5917
set craft_name = Maxymilaniys
```

```
profile 0
```

```
profile 1
```

```
profile 2
```

```
profile 3
```

```
# restore original profile selection
```

```
profile 0
```

```
rateprofile 0
```

```
rateprofile 1
```

```
rateprofile 2
```

```
rateprofile 3
```

```
# restore original rateprofile selection
```

```
rateprofile 0
```

```
# save configuration
```

**ДОДАТОК В**  
**(обов'язковий)**  
**ПРЕЗЕНТАЦІЯ**

**Метод розроблення та налаштування  
системи оперативної зміни параметрів  
радіозв'язку літальних апаратів**

*Автор: Псьол Максим*

**Мета і завдання роботи:**

Метою роботи є підвищення надійності та завадостійкості радіозв'язку у FPV-системах шляхом розробки і впровадження адаптивного алгоритму вибору частотного каналу для передачі радіосигналу

**Завдання роботи:**

- ◆ аналіз технологій БПЛА
- ◆ огляд систем зв'язку, що використовуються у БПЛА на полі бою
- ◆ розробка алгоритму оперативного перемикання телеметрії
- ◆ створення робочого прототипу для FPV-дрону

## FPV-дрони

FPV-дрони (First Person View) - це безпілотні літальні апарати, оснащені камерами, що передають відео в реальному часі оператору, дозволяючи керувати дроном «від першої особи»



## FPV-дрони у сучасній війні

У сучасному світі FPV - дрони стали більше використовуватись у якості зброї та показали свою ефективність на полі бою. Дрони стали ключовим елементом тактичної переваги на полі бою, дозволяючи військовим ефективно виконувати місії зменшуючи ризики для особового складу



## Зв'язок

Зв'язок – це найважливіша складова у FPV-дроні, оскільки втрата зв'язку означає втрату одиниці зброї, що веде за собою меншу ефективність на полі бою. Стабільний зв'язок є критично важливим для ефективного управління FPV-дроном, оскільки будь-яке переривання сигналу може призвести до втрати борта та зриву місії.



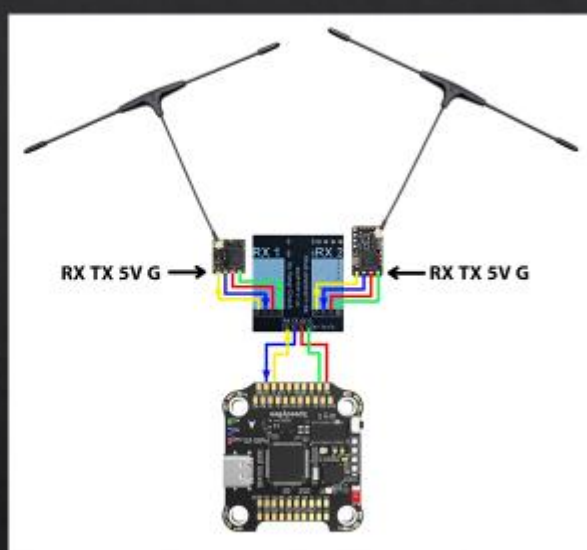
## Радіо-електронна боротьба (РЕБ)

Як у нас, так і у ворога на озброєнні є багато видів систем РЕБ, призначених для глушіння радіозв'язку. Активне застосування засобів РЕБ створює серйозну загрозу для FPV-дронів, що зумовлює необхідність постійної модернізації систем зв'язку, впровадження новітніх технологій та адаптивних рішень.



## Протидія РЕБ

Для протидії РЕБ використовуються різноманітні технології, серед яких вирізняється подвійна система радіозв'язку



## Система оперативної зміни частоти зв'язку

Суть технології подвійного зв'язку полягає в оперативному перемиканні між різночастотними засобами радіозв'язку для збереження стабільного контролю над дроном в умовах РЕБ.



## Тестування системи

Під час тестування система показала свою ефективність та актуальність у сучасних реаліях війни



Дякую за увагу

### Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Максим ПСЬОЛ

**Співавтор:**

**Назва:** Псьол\_Метод розроблення та налаштування системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку літальних апаратів

**Експерт:**

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:**17%

**Коефіцієнт подібності 2:**14.3%

**Мікропробіли:** 20

**Заміна букв:** 2

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2025-05-19 21:56:22.0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

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

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

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

**Обґрунтування:**

2025-05-20

*Дата*



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

## Anti-Plagiarism v-15.274 Educational

**The maximum coincidence with one document 4.0%**

Dictionary check: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Errors in the documents: 11%

ID: 241437 Title: МКР Метод розроблення та налаштування системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку літальних апаратів Added in a DB: 2025-05-19 Authors: Максим ПСЬОЛ Heads: Олексій ІВАНОВ Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	178022	1457	8148 (5%)	103 (7%)

### Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Максим ПСЬОЛ

Тема: Метод розроблення та налаштування системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку літальних апаратів

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 129

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано систему оперативної зміни параметрів радіозв'язку FPV-дронів

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі розглянуто основні поняття, технічну будову FPV-дронів та їхнє військове застосування. У другому розділі дипломної роботи проаналізовано технічні аспекти забезпечення надійного зв'язку для FPV-дронів у бойових умовах, зокрема розглянуто типи антен і їхні характеристики. У третьому розділі дипломної роботи детально описано процес налаштування та програмування системи подвійного зв'язку FPV-дрона з використанням протоколу ExpressLRS. У четвертому розділі на основі експериментального тестування підтверджено ефективність системи True Diversity RX/TX для FPV-дронів у складному радіочастотному середовищі.

4. Позитивні сторони роботи: Розроблена система оперативної зміни параметрів радіозв'язку для БПЛА значно підвищує стійкість до впливу ворожих засобів радіоелектронної боротьби та має потенціал для впровадження в наявні технічні екосистеми.

5. Негативні сторони роботи: Мало уваги приділено питанню подальшого розвитку системи

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно з діючими стандартами оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на доброму рівні.

8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 4.0 (В)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) \_\_\_\_\_  
д.т.н., професор, Мартинюк В.В., завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки \_\_\_\_\_

“ 21 травня ” \_\_\_\_\_ 2025р.



Завідувачу кафедри КІС  
доктору філософії, доценту  
Ользі ПАВЛЮВІЙ

Псьола Максима Сергійовича

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-23-3

### ЗАЯВА

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

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

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

21 травня 2025 року

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

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

Назва: Метод розроблення та налаштування системи оперативної зміни параметрів радіозв'язку літальних апаратів

Автор: Псьол Максим Сергійович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Іванов Олексій Валентинович, к.т.н., доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи.	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

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

- 1) збіги, зафіксовані системою, мають фрагментарний характер і є випадковими, оскільки охоплюють лише невеликі ділянки тексту;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 4) частина збігів, зафіксованих системою, стосується загальноживаних термінів та словосполучень, що не можуть бути віднесені до унікального авторського тексту;
- 5) зафіксовані збіги у вигляді джерел та посилань мають технічний характер і не є об'єктом авторського права, а отже не можуть розцінюватися як порушення.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 16.96% і адресується до 13 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 11%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС

Олексій ІВАНОВ

Олег САВЕНКО

Ольга ПАВЛОВА