

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розробка модуля для підвищення стійкості зв'язку з дроном в умовах електромагнітних впливів
(тема)

Виконав:
студент 4 курсу, групи ТРИТЗР-20-1
Ковальов Д. О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Інтелектуальні технології засобів радіоелектроніки
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. КІТАР Жарікова І. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Як студент ХНУРЕ, Я розумію та підтримую політику навчального закладу щодо академічної доброчесності. Я не надавав і не отримувал неналежної допомоги в підготовці до кваліфікованої роботи. Для використання ідей, результатів та текстів інших авторів є посилання на відповідні джерела.

01.06.2024



Ковальов Д. О.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет	АКТ
Кафедра	КІТАР
Рівень вищої освіти	перший (бакалаврський)
Спеціальність	172 Телекомунікації та радіотехніка
Тип програми	Освітньо-професійна
Освітня програма	Інтелектуальні технології засобів радіоелектроніки (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

(підпис)

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Ковальову Дмитрію Олександровичу
(шифр і назва)

1. Тема роботи: Розробка модуля для підвищення стійкості зв'язку з дроном в умовах електромагнітних впливів

Затверджена наказом університету від 20.05.2024 р. № 479 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Розробити модуль для підвищення стійкості зв'язку в умовах електромагнітних впливів; 3.2 Функції модуля: зв'язок з дроном і пультом керування, протидія електромагнітним завадам; 3.3 Умови експлуатації: температура – від -20 °С до +60 °С, вологість не більше 95 % за температури до +25 °С, уникати транспортних підстанцій; 3.4 Розміри антени: 5 см × 5 см, живлення – 5 В, частота роботи – 915 МГц.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз технічного завдання; 4.3 Розробка прототипу дрону; 4.4 Розробка модуля для подолання електромагнітних перешкод; 4.5 Розробка модуля для подолання електромагнітних перешкод; 4.6 Результат роботи розробленого модуля; 4.7 Питання охорони праці; 4.8 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі (*.png) формату А4 – 10 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по-батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної галузі	01.04.2024	<i>виконано</i>
2	Створення прототипу дрону	03.04.2024	<i>виконано</i>
3	Проектування модуля зв'язку	03.05.2024	<i>виконано</i>
4	Розробка модулю	12.05.2024	<i>виконано</i>
5	Тестування програмної системи	16.05.2024	<i>виконано</i>
6	Оформлення пояснювальної записки	07.06.2024	<i>виконано</i>
7	Подання роботи на нормоконтроль	07.06.2024	
8	Перевірка роботи на плагіат	12.06.2024	
9	Отримання відгуку та рецензії	16.06.2024	
10	Подання роботи до ЕК	19.06.2024	
11	Підготовка презентації та доповіді	20.06.2022	

Дата видачі завдання 29 квітня 2024 р.

Студент Ковальов Д. О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи Жарікова І. В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 70 стор., 68 рис., 1 дод., 14 джерел.

ЕЛЕКТРОПЕРЕШКОДИ, ДРОН, АНТЕНА, ЗВ'ЯЗОК З ДРОНОМ, МОДУЛЬ З'ЯЗКУ.

Об'єкт розробки – процес забезпечення стабільного зв'язку з FPV-дронами, які стикаються з проблемою втрати сигналу і електромагнітних завад.

Предмет розробки – апаратний комплекс забезпечення стабільного зв'язку між дроном і пультом управління.

Мета розробки – підвищення якості зв'язку, зниження впливу електромагнітних завад на роботу безпілота, а також забезпечення стабільного управління і передачі відеосигналів на великі відстані.

Метод вирішення – розробка та виготовлення саморобної антени типу біквдрат кругової поляризації, використання підсилювача RadioMaster Bandit Micro ExpressLRS 1W 915MHz RF Module, оптимізація розташування компонентів та застосування алгоритмів динамічного регулювання потужності передавача.

У результаті розробки було спроектовано та реалізовано прототип дрона, який включає наступний функціонал: стабільний зв'язок на частоті 915 МГц для управління дроном, передача відеосигналу на частоті 5,8 ГГц через FPV-передавач, покращення якості зв'язку за допомогою антени та підсилювача сигналу. Виконано розрахунки довжин хвиль, секцій і відстаней для забезпечення оптимальних параметрів антени. Виконано виготовлення антени з мідної пластини та кабелю RG402, її монтаж та паяння до з'єднувача SMA. Ці заходи значно покращили стабільність та якість зв'язку між дроном та пультом керування, забезпечивши надійне управління навіть в умовах високих електромагнітних перешкод.

ABSTRACT

Explanatory note: 70 pages, 68 pictures, 1 appendix, 14 sources.

ELECTRIC INTERFERENCE, FPV, ELECTRICAL INTERFERENCE, DRONE, ANTENNA, DRONE COMMUNICATION, COMMUNICATION MODULE.

The object of development is a module for countering electromagnetic interference.

The subject of development is a hardware complex for ensuring stable communication between the drone and the control panel.

The purpose of the development is to improve the quality of communication, reduce the impact of electromagnetic interference on the drone's operation, and ensure stable control and transmission of video signals over long distances.

The solution method was the development and manufacture of a homemade bi-square circular polarisation antenna, the use of a RadioMaster Bandit Micro ExpressLRS 1W 915MHz RF Module amplifier, optimisation of the components' arrangement and the application of dynamic transmitter power control algorithms.

As a result of the development, a drone prototype was designed and implemented, which includes the following functionality: stable communication at a frequency of 915 MHz for drone control, video signal transmission at a frequency of 5.8 GHz via an FPV transmitter, and improved communication quality using a homemade antenna and signal amplifier. Wavelengths, sections and distances were calculated to ensure optimal antenna parameters. Manufacturing of the antenna from a copper plate and RG402 cable, its installation and soldering to an SMA connector. Optimisation of data transmission algorithms and component placement to reduce the impact of electromagnetic interference. These measures have significantly improved the stability and quality of communication between the drone and the control panel, ensuring reliable control even in high electromagnetic interference conditions.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Аналіз технічного завдання.....	7
1.1 Аналіз існуючих дронів та їх стійкості до електромагнітних завад.....	7
1.2 Вивчення технічних аспектів електромагнітної сумісності	15
1.3 Електромагнітні завади та їх вплив на електроніки.....	18
2 Аналіз засобів для електромагнітного захисту дрону.....	23
2.1 Електромагнітні перешкоди та антени.....	23
2.2 Антена типу біквадрат	23
2.3 Постановка завдання на наступні розділи	23
3 Процес складання прототип дрону.....	25
3.1 Процес виготовлення прототипу.....	26
3.2 Прошивка дрону.....	42
3.3 Подолання електромагнітних перешкод.....	56
3.4 Заходи з охорони праці під час складання дрону.....	67
Висновки.....	68
Перелік джерел посилання.....	70
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	72

ВСТУП

З розвитком безпілотних літальних апаратів і стрімким зростанням використання дронів у різних галузях промисловості зростає ризик електромагнітних перешкод для їхньої роботи. Електромагнітні перешкоди можуть призвести до втрати зв'язку, неконтрольованих падінь і навіть пошкодження дронів. Тому розробка дронів з підвищеною стійкістю до електромагнітних завад є актуальною проблемою в галузі безпілотних літальних апаратів.

Забезпечення стійкості дронів до електромагнітних завад має вирішальне значення для забезпечення безпеки польотів, ефективності використання дронів у комерційних та військових цілях, а також надійності та тривалості роботи дронів в умовах мінливої електромагнітної обстановки.

Мета роботи – розробити модуль відповідно до існуючих вже моделей, але покращити його для підтримки зв'язку в умовах електромагнітних перешкод.

Об'єкт розробки – процес забезпечення стабільного зв'язку з FPV-дронами, які стикаються з проблемою втрати сигналу і електромагнітних завад. Ситуації, в яких обмін даними стає нестабільним і можуть виникнути серйозні проблеми, такі як управління безпілотником, погіршення якості передачі відео та навіть нещасні випадки з дроном. Відповідно до цього, існує гостра необхідність у вдосконаленні системи зв'язку для забезпечення стабільного і надійного управління дроном в умовах сильного електромагнітного випромінювання. У даній роботі пропонується розробити спеціальний модуль для поліпшення зв'язку між дроном і пультом управління, при цьому знижуючи вплив перешкод в зв'язку при підвищенні надійності з'єднання.

Предмет розробки – специфічний компонент системи зв'язку, тобто спеціальна антена для FPV дрону. Ця антена призначена для поліпшення якості прийому і передачі сигналу завдяки високому коефіцієнту посилення і поліпшеним характеристикам спрямованості. Біквдратна антена дозволяє більш

ефективно боротися з електромагнітними перешкодами, забезпечуючи більш стабільне з'єднання на великих відстанях. У рамках цієї роботи було детально розглянуто конструкцію, виробництво, вплив на якість зв'язку та її здатність протистояти електромагнітним перешкодам.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести огляд уже існуючих дронів і обрати необхідні компоненти, при цьому зробити складання такого прототипу доступною;
- розробити схему модуля для покращення зв'язку з дроном;
- обрати необхідний матеріал корпусу антени і передавач для пульту керування та зв'язку з коптером;
- розрахувати частоти роботи прототипу антени та його фактичні розміри;
- оформити кваліфікаційну роботу відповідно до заданих умов [1].

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1. Аналіз предметної галузі

Існують різні типи дронів, що відрізняються за розміром, функціями та призначенням. Одним з найпоширеніших є квадрокоптер, який має чотири гвинти (мультироторні дрони «Quadcopters») і яким легко керувати в повітрі (рис. 1.1). Ці дрони підходять для фотографування, відеозйомки, моніторингу, наукових досліджень та розваг.



Рисунок 1.1 – Мультироторні дрони

Фіксовані дрони мають нерухомі крила, що дозволяє їм літати на великі відстані і протягом тривалого часу. Такі дрони часто використовують для геологічних досліджень, моніторингу великих територій (рис. 1.2).

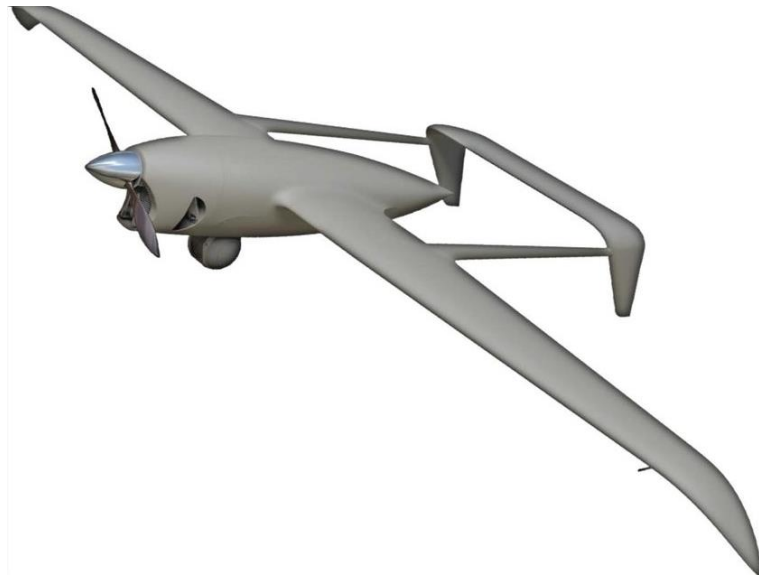


Рисунок 1.2 – Фіксованокрильцеві дрони (Fixed-wing drones)

Гібридні дрони поєднують в собі переваги багатогвинтових дронів і дронів з фіксованим крилом. Вони можуть злітати і сідати вертикально, але також можуть літати на великі відстані, як дрони з фіксованим крилом (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Гібридні дрони (Hybrid drones)

Мініатюрні дрони мають дуже малий розмір і зазвичай призначені для рекреаційного або побутового використання. Вони мають обмежену функціональність, але дуже популярні серед ентузіастів технологій (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Мініатюрні дрони (Mini drones)

Дрони з вертикальним зльотом і посадкою (VTOL) можуть злітати і приземлятися вертикально, а також переходити в режим горизонтального польоту. Вони ідеально підходять для спеціальних застосувань, таких як рятувальні операції та доставка вантажів (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Вертикально зльотно-посадкові дрони (VTOL drones)

Аналіз стійкості до електромагнітних завад існуючих дронів може бути складним через широкий спектр моделей дронів та різноманітність ситуацій, що впливають на їхню роботу. Однак існують загальні принципи і рішення, які можуть бути використані для підвищення стійкості дронів до електромагнітних

завад. Електромагнітне екранування, деякі дрони вже оснащені системами захисту від електромагнітних завад. Це включає в себе екранування електронного обладнання, захист від перешкод в радіочастотному діапазоні та інші заходи. Двигун і системи управління, інші моделі дронів оснащені більш надійними двигунами і системами управління, які можуть краще протистояти електромагнітним перешкодам. Це може включати високоякісні контролери польоту і електромагнітно сумісні двигуни. Характеристики дрона, такі як діапазон частот, потужність передавача і приймача та антени, можуть впливати на стійкість до електромагнітних перешкод. Деякі моделі можуть мати ширший діапазон частот або кращі антени, що дозволяє їм краще працювати в умовах електромагнітних перешкод. Досягнення в галузі штучного інтелекту та автономних систем керування можуть дозволити дронам краще адаптуватися до електромагнітних перешкод, автоматично змінюючи траєкторію польоту або визначаючи та уникаючи перешкод. Випробування електромагнітного імунітету дронів у реальних умовах може виявити їхню ефективність та недоліки. Тестування в різних середовищах і умовах може допомогти поліпшити дизайн і функціональність. Беручи до уваги ці фактори, важливо адаптувати дрон до конкретних потреб і умов експлуатації, щоб він забезпечував найкращий можливий захист від електромагнітних завад. Електромагнітна стійкість дрона – це комплекс заходів, спрямованих на запобігання або зменшення впливу електромагнітних завад на роботу дрона [2].

Методи електромагнітного захисту:

- захист електронних компонентів дрона від електромагнітних полів за допомогою екранування або екрануючих матеріалів. Сюди входять спеціальні корпуси або покриття, які зменшують вплив зовнішніх електромагнітних полів на електроніку дрона;

- фільтрація і блокування сигналу, використання фільтрів і блокуючих пристроїв для зменшення електромагнітних перешкод, які можуть вплинути на роботу радіосистеми дрона. Сюди входить використання антенних фільтрів і пристроїв блокування певних частот;

– двоканальна система – система з двома резервними каналами для забезпечення надійного зв'язку між дроном і пультом керування. Якщо один канал глушиться, дрон може автоматично переключитися на інший.

Автоматичне виявлення та уникнення перешкод є важливою особливістю вбудованих систем безпілотників, які можуть автоматично виявляти та уникати електромагнітних перешкод, змінюючи траєкторію польоту. Цього можна досягти за допомогою оптичних датчиків або систем візуального наведення, коли радіозв'язок недоступний або ускладнений електромагнітними перешкодами. Ці методи можна використовувати окремо або в комбінації, щоб забезпечити максимальний захист від електромагнітних перешкод.

Двигун і система керування є ключовими компонентами, що забезпечують відсутність електромагнітних перешкод для дрона. Електромагнітна сумісність (ЕМС) важлива для його безперебійної роботи. Тому двигун і система керування повинні мати високий рівень електромагнітної сумісності, щоб електромагнітні перешкоди не впливали на їхню роботу. Це включає в себе використання екранування, захист від радіочастотних перешкод та інші заходи для забезпечення стабільної та надійної роботи дрона в умовах електромагнітних перешкод [2].

Стійкість до електромагнітних перешкод дуже важлива річ для при конструюванні дронів. Двигун і система керування повинні бути здатні протистояти електромагнітним перешкодам, які можуть генеруватися іншим електронним обладнанням або перешкодами в навколишньому середовищі.

Діапазон робочих частот є одним з найважливіших причин до правильного керування дроном з метою підтримання постійного зв'язку. Зміна частоти дозволяє уникнути зіткнень і електромагнітних перешкод з іншим електронним обладнанням. Деякі системи керування мають можливість перемикатися на інші радіочастоти для підвищення стабільності [3].

Двигун повинен мати достатній запас потужності, щоб забезпечити стабільний політ у разі електромагнітних перешкод в електромережі.

Система управління може мати вбудовані алгоритми для виявлення

електромагнітних перешкод і автоматичної корекції траєкторії польоту для забезпечення стабільності.

Деякі системи управління мають можливість автоматичного перемикання на резервний канал або систему для забезпечення надійного управління в разі порушення зв'язку через електромагнітні перешкоди.

Технічні характеристики дронів можуть впливати на їхню стійкість до електромагнітних перешкод. Дрони, що працюють у широкому діапазоні частот, можуть з більшою ймовірністю уникати перешкод у радіочастотному діапазоні. Вища вихідна потужність передавача і приймача може забезпечити кращий зв'язок і дозволити дронам працювати в умовах слабких сигналів і електромагнітних перешкод. Високоякісні антени з високим коефіцієнтом підсилення можуть поліпшити якість зв'язку і забезпечити кращу продуктивність в умовах електромагнітних перешкод. Дрони, що працюють на великій висоті, можуть менше піддаватися впливу сусідніх джерел електромагнітного випромінювання, таких як електромагнітні поля від електронних пристроїв та сусіднього обладнання. Надійні системи електроживлення та акумулятори можуть забезпечити стабільну роботу дрона навіть за наявності електромагнітних перешкод. Висока електромагнітна сумісність всіх компонентів дрона може забезпечити стабільну роботу системи в умовах електромагнітних перешкод.

Загальна мета полягає в тому, щоб вибрати дрон з технічними характеристиками, які дозволять йому ефективно працювати, незважаючи на електромагнітні перешкоди [4].

Системи автоматичного керування відіграють важливу роль у багатьох аспектах безпілотників, включаючи стійкість до електромагнітних завад; при розробці систем автоматичного керування треба також враховувати вимоги до стійкості до електромагнітних завад. Розробка алгоритмів автономного керування, які дозволяють дрону приймати рішення на основі власних датчиків і даних, щоб уникнути електромагнітних перешкод і забезпечити безпечний політ. Інтеграція систем, що дозволяють дронам автоматично виявляти

перешкоди, які містять електромагнітні завади, та уникати їх, змінюючи траєкторію польоту або зупиняючись. Розробка алгоритмів управління траєкторією польоту, які враховують електромагнітні перешкоди та автоматично коригують траєкторію польоту для їх уникнення. Використання систем стабілізації, здатних підтримувати стабільний політ в умовах впливу електромагнітних завад. Використання високоточних датчиків і алгоритмів штучного інтелекту для точного визначення стану навколишнього середовища і прийняття відповідних рішень. Розробка систем, що дозволяють дрону автоматично виявляти і відновлювати нормальну роботу в разі виникнення електромагнітних перешкод.

Ці аспекти можуть бути використані як основа для розробки систем автоматичного керування, що гарантують стійкість дронів до електромагнітних завад. Важливо також провести відповідні експерименти та випробування для перевірки ефективності розробленої системи в реальних умовах експлуатації.

Тестування та валідація автоматизованих систем управління на стійкість до електромагнітних завад є важливим етапом у розробці безпілотників. Програмне забезпечення використовується для імітації електромагнітних полів і перешкод, які можуть виникнути в реальному середовищі. Це дозволяє перевірити реакцію системи на різні типи перешкод і оцінити її надійність. Проведення експериментів у контрольованому лабораторному середовищі, систематичне створення різних типів електромагнітних завад і спостереження за реакцією системи. Проведення контрольованих випробувань у спеціально обладнаних місцях, де електромагнітні перешкоди можуть бути створені в реальних умовах, але в контрольованих умовах. Проведення випробувань у реальних умовах, наприклад, на відкритому повітрі, де можуть виникати різноманітні електромагнітні перешкоди, включаючи електромагнітні перешкоди від іншого електронного обладнання та інфраструктури. Після проведення випробувань важливо проаналізувати отримані дані і підтвердити, що вимоги до стійкості системи до електромагнітних завад виконані. Валідація гарантує, що система ефективно працює в реальних умовах. Необхідно

переконалися, що розроблена система відповідає відповідним стандартам безпеки, що регулюють використання дронів та інших автономних систем. Тестування та валідація можуть допомогти гарантувати, що розроблені системи автоматичного керування не створюють електромагнітних перешкод і надійно працюють за різних умов експлуатації [5].

1.2 Вивчення технічних аспектів електромагнітної сумісності

Дослідження та аналіз національних і міжнародних стандартів, що регулюють вимоги до ЕМС для аерокосмічних систем. Дослідження впливу різних умов, таких як атмосферний тиск, температура, вібрація та випромінювання, на електромагнітну сумісність аерокосмічних систем. Аналізує електромагнітну сумісність певного обладнання, такого як радіостанції, передавачі та навігаційні системи, щоб забезпечити відповідність вимогам ЕМС. Вивчення різних методів випробувань ЕМС та інструментів, що використовуються для оцінки впливу електромагнітних полів на системи. Вивчення впливу електромагнітної сумісності на безпеку польотів та ефективність аерокосмічних місій. Розробка стратегій і методів управління електромагнітною сумісністю для забезпечення безпеки та ефективності аерокосмічних систем.

Стандарти електромагнітної сумісності визначають вимоги та методи оцінки взаємодії електронного обладнання та систем з електромагнітним середовищем, включаючи електромагнітні завади та сумісність. Дотримання цих стандартів забезпечує нормальну роботу і безпеку електронного обладнання в різних умовах.

Деякі з найважливіших стандартів електромагнітної сумісності включають наступні стандарти:

– EN 550XX (EN 55011, EN 55022, EN 55032) – стандарт електромагнітної сумісності різного електричного, електронного та радіоблабнання; EN 55011, EN 55022, EN 55032 – стандарт електромагнітної сумісності різного

електричного, електронного та радіообладнання;

– CISPR 22/32 – CISPR (Міжнародна комісія з електромагнітної сумісності радіообладнання: Міжнародна спеціалізована комісія з електромагнітної сумісності радіообладнання) стандарт щодо обмеження електромагнітних перешкод, спричинених радіообладнанням, необхідним для продажу на ринку Європейського Союзу;

– Серія IEC 61000 – серія стандартів, розроблених Міжнародною електротехнічною комісією (IEC), що встановлюють вимоги до електромагнітної сумісності для різних типів електрообладнання та систем.

– MIL-STD-461 – військовий стандарт, який визначає вимоги до електромагнітної сумісності для оборонного обладнання;

– ISO 11452 – стандарт Міжнародної організації зі стандартизації (ISO), що встановлює методи випробувань і вимоги до електромагнітної сумісності в автомобільній електроніці [6].

Стандарти встановлюють вимоги до електромагнітної сумісності для різних типів електронного та електричного обладнання і систем з метою забезпечення надійної роботи в реальних умовах і мінімізації впливу електромагнітних завад [7].

ЕМС визначає поведінку електронних систем і пристроїв в різних умовах навколишнього середовища, включаючи атмосферний тиск, температуру, вологість, вібрацію, випромінювання та інші фактори; недотримання вимог ЕМС може призвести до збоїв в роботі і виходу з ладу електронного обладнання. Великі коливання атмосферного тиску можуть впливати на роботу електронного обладнання, особливо чутливих пристроїв, таких як датчики і мікропроцесори. Екстремальні температури можуть викликати теплові проблеми в електронному обладнанні, такі як перегрів і охолодження, що може вплинути на надійність і функціональність. Висока вологість може викликати корозію і конденсацію на внутрішніх компонентах електронних пристроїв, що призводить до коротких замикань і пошкоджень. Високий рівень вібрації та ударів може спричинити ослаблення з'єднань, пошкодження електронних компонентів і руйнування

контактів, що призведе до збоїв у роботі обладнання або виходу його з ладу. Електромагнітне випромінювання може впливати на електронне обладнання, яке особливо чутливе до електромагнітних полів, наприклад, супутникові системи та медичне обладнання [9].

Для забезпечення електромагнітної сумісності середовища існують фактори, які необхідно враховувати при проєктуванні, випробуванні та експлуатації електронного обладнання та систем. Випробування на відповідність та належний дизайн можуть допомогти забезпечити належне функціонування електронного обладнання в різних робочих середовищах.

Електромагнітна сумісність обладнання є важливим елементом у процесі розробки електронного обладнання та систем, гарантуючи, що різні пристрої можуть співіснувати без перешкод в електромагнітному спектрі [11].

Ключові моменти електромагнітної сумісності:

- випромінювання (ЕМВ) – характеристика електронного обладнання, яке випромінює електромагнітні сигнали. Електронне обладнання повинно відповідати нормам випромінювання, щоб не заважати роботі іншого обладнання;

- чутливість (імунітет), здатність обладнання реагувати на зовнішні електромагнітні сигнали. Обладнання повинно бути достатньо стійким до електромагнітних перешкод, щоб забезпечити нормальну роботу в реальних умовах;

- для забезпечення електромагнітної сумісності для багатьох видів електронного обладнання встановлені загальні вимоги, стандарти і норми ЕМС. Ці вимоги можуть включати обмеження на рівні випромінювання і стандарти стійкості до зовнішніх електромагнітних сигналів;

- випробування на електромагнітну сумісність, щоб забезпечити відповідність вимогам електромагнітної сумісності, електронне обладнання зазвичай піддається випробуванням на випромінювання і стійкість до зовнішніх сигналів у спеціально обладнаних лабораторіях;

- розробники електронного обладнання повинні враховувати вимоги

ЕМС при проектуванні і випробуваннях обладнання і повинні дотримуватися всіх вимог відповідних стандартів;

– дотримання вимог електромагнітної сумісності обладнання забезпечує надійність і безпеку роботи електронного обладнання в різних умовах експлуатації та дозволяє уникнути можливих перешкод в роботі іншого обладнання та систем [8].

1.3 Електромагнітні завади

Електромагнітні випромінювання спричиняються іншим електронним обладнанням, системними сигналами або зовнішніми джерелами, такими як радіо- і телевізійні станції, радари і т. д. ЕМВ можуть створювати перешкоди для бортового електронного обладнання, змінювати сигнали або викликати несправність обладнання.

Електромагнітні перешкоди спричиняються електромагнітними полями, що генеруються електрообладнанням, електромережами, високовольтними лініями, радіо- та телекомунікаційними системами; ЕМС може спричинити спотворення сигналу, втрату даних або пошкодження обладнання.

Електростатичний розряд (ESD) спричиняється накопиченням статичної електрики на поверхнях або в обладнанні, що може пошкодити електронні компоненти.

Радіаційний вплив спричинений космічним випромінюванням або ядерними реакціями і може призвести до змін у пам'яті, пошкодження даних або виходу з ладу обладнання.

Для зменшення впливу електромагнітних завад на бортове електронне обладнання вживаються різні заходи, зокрема екранування, фільтрація, ізоляція, належне проектування та використання електронних компонентів. Також проводяться випробування на електромагнітну сумісність та відповідність стандартам, щоб переконатися, що бортова електроніка не створює електромагнітних завад [9].

Електромагнітні випромінювання – це випромінювання електромагнітних хвиль від електронного обладнання та систем, що працюють в електромагнітному спектрі. Це може спричинити електромагнітні перешкоди для іншого електронного обладнання та інших систем зв'язку, що працюють поблизу. Не все електронне обладнання генерує певну частоту коливань, але електронне обладнання, яке генерує ЕМВ, може бути джерелом електромагнітних завад.

Джерела ЕМВ можуть виникати від різноманітного електронного обладнання, такого як двигуни, перетворювачі електроенергії та перемикачі, а також від зовнішніх джерел, таких як лінії електропередач, радіостанції та телевізійні станції. Вплив на електронні системи ЕМВ, може впливати на електронні системи, спричиняючи спотворення сигналу, перебої в роботі, втрату даних або вихід обладнання з ладу.

У багатьох країнах діють стандарти і правила, які встановлюють обмеження на рівні ЕМВ для різних типів електронного обладнання. Дотримання цих стандартів є обов'язковим перед випуском багатьох пристроїв на ринок. Зменшення ЕМВ, інженери зазвичай використовують різноманітні методи для зменшення електромагнітних випромінювань, такі як екранування, фільтрація, правильне розташування та заземлення електронних компонентів.

Загалом, контроль електромагнітного випромінювання є важливою складовою процесу розробки та виробництва електронних пристроїв, оскільки він допомагає забезпечити нормальну роботу пристроїв і уникнути можливих перешкод для інших систем [10].

Електростатичний розряд – це процес, при якому різниця потенціалів між об'єктами спричиняє вивільнення електричної енергії, накопиченої на поверхнях або всередині обладнання. Статична електрика накопичується і генерується, коли два матеріали з різною провідністю труться один об одного, розсуваються або контактують один з одним; електростатичний розряд може спричинити широкий спектр проблем в електронному обладнанні та компонентах, включаючи несправності та пошкодження.

Електростатичний розряд може виникати під час різних процесів, таких як розпакування, складання, транспортування або під час роботи електронних компонентів. Найпоширенішими причинами є тертя, контакт з непровідними матеріалами та перепади вологості повітря.

Вплив електростатичного розряду на електроніку може спричинити коротке замикання, пошкодження внутрішньої структури електронних компонентів та зміну продуктивності. Навіть невеликі електростатичні розряди можуть впливати на чутливе електронне обладнання та призводити до несправностей.

Для запобігання електростатичного розряду вживаються різні захисні заходи, такі як використання упаковки для захисту від статичної електрики, заземлення робочого місця, використання спеціального електроізоляційного обладнання, носіння антистатичного одягу та використання антистатичних манекенів.

Також існують стандарти та керівні принципи для контролю ЕУР у виробничому середовищі та під час обробки електронних компонентів. Вони встановлюють вимоги до умов праці, обладнання та процедур для мінімізації ризиків електростатичного розряду.

Оскільки електростатичні розряди є серйозною загрозою для електронного обладнання та компонентів, важливо вживати заходів для запобігання та контролю електростатичних розрядів на всіх етапах їх життєвого циклу.

2 АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗАХИСТ ДРОНУ

2.1 Електромагнітні перешкоди та антени

Електромагнітні перешкоди можуть виникати з різних причин і мати різні характеристики. Це може бути викликано різними радіопередавачами або пристроями, що працюють на тій же частоті, що і системи FPV. Наприклад, радіоаматори, які використовують аналогові системи, або інші пілоти FPV, які тестують дрони, можуть створювати радіочастотні перешкоди. Електронні пристрої, такі як мобільні телефони, маршрутизатори Wi-Fi та мікрохвильові печі, можуть генерувати електромагнітні сигнали, які можуть перешкоджати сигналам FPV. В умовах конкуренції або щільної забудови, де багато пілотів використовують безпілотні літальні апарати або моделі бездротового управління, перешкоди можуть виникати через неузгодженість сигналів. Електромагнітні сигнали можуть випромінюватися від природних джерел, таких як блискавки або сонячні бурі. Всі ці електромагнітні перешкоди можуть виникати на різних частотах, в залежності від джерела і характеристик сигналу. Звичайні мобільні телефони зазвичай працюють на частотах від 800 МГц до 2,4 ГГц, тоді як мережі Wi-Fi можуть використовувати частоти від 2,4 ГГц до 5 ГГц. Враховуючи ці перешкоди, модуль має бути спроектований з високим коефіцієнтом посилення й ефективністю, щоб забезпечити стабільний зв'язок в умовах електромагнітних перешкод.

2.2 Антена типу біквадрат

Біквадратна антена, або подвійна квадратна антена – це антена, що складається з 8 квадратних елементів, розташованих у формі, що нагадує вісімку. Така конструкція забезпечує підвищене посилення та поліпшену спрямованість, що робить її ефективною для використання в високочастотних системах,

включаючи бездротовий зв'язок.

Головною особливістю біквдратної антени є її високий коефіцієнт підсилення, який забезпечує можливість передачі і прийому сигналів на великі відстані. Це досягається за рахунок конструкції з 2 квадратних елементів, які ефективно концентрують енергію в певному напрямку. Завдяки вузькій діаграмі спрямованості антена може концентрувати енергію в обраному напрямку, зменшуючи вплив перешкод з інших напрямків.

Біквдратні антени також відомі своєю відносною простотою виготовлення. Вони можуть бути виготовлені з доступних матеріалів, таких як мідний дріт та металеві пластини. Даний тип антен можуть бути налаштовані для вертикальної, горизонтальної або кругової поляризації. Саме в цій роботі розробили антену з круговою поляризацією.

Конструкція біквдратної антени – це 8 однакових квадратних елементів, що утворюють фігуру вісімки, металева пластина, що виконує роль відбивача, розміщується на певній відстані від квадратного елемента для відображення сигналу і підвищення ефективності антени. Для підключення антени до передавача або приймача використовується коаксіальний кабель з хвильовим опором 50 Ом , крім того, для надійного кріплення антени до відповідної опори або щогли необхідні механічні деталі. При створенні таких прототипів важливо розрахувати довжину хвилі, яка визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{u}{\nu}, \quad (2.1)$$

де λ – довжина хвилі, м;

ν – частота, МГц;

u – швидкість поширення хвилі, м/с.

Елементи кожного квадрата складаються з 4 сторін, кожна з яких має довжину $\pi/4$. Відстань між елементом і відбивачем зазвичай становить $\lambda/8$ для забезпечення оптимальної спрямованості та посилення.

Біквдратні антени мають значні переваги в порівнянні зі звичайними антенами, які часто використовуються в системах FPV, завдяки високому коефіцієнту посилення і кращій спрямованості біквдратні антени можуть забезпечити значно більшу дальність дії і стабільність сигналу. Якщо порівняти з традиційними всеспрямованими антенами, двошвидкісні антени більш ефективно фокусують енергію в певному напрямку, тим самим знижуючи вплив перешкод і покращуючи якість зв'язку.

2.3 Постановка завдання на наступні розділи

Третій розділ охоплює розробку прототипу дрону і його налаштування. В контексті йтиметься про процес вибору компонентів для створення безпілотних літальних апаратів, їх інтеграції та налаштування. Основні завдання в цьому розділі включають вибір та опис ключових компонентів безпілотника, таких як рама, контролер польоту, двигун, камера та передавач FPV. Далі розглянули інтеграцію обраних компонентів в єдину систему. Особлива увага приділяється розробці програмного забезпечення для контролерів польоту та інших електронних компонентів. Також буде описана конфігурація системи зв'язку між дроном і наземною станцією управління. В кінці розділу буде проведено початкове тестування і налагодження прототипу дрона для забезпечення стабільної і надійної роботи. Цей розділ важливий для створення функціональних прототипів безпілотників і послужить основою для подальших досліджень та розробок. Також у цьому розділі ми розглянемо способи та технічні рішення для забезпечення стабільного зв'язку та мінімізації електромагнітних перешкод, які можуть вплинути на роботу безпілотника. Для зменшення впливу перешкод і підвищення надійності зв'язку також розглядається можливість використання альтернативних частот. Метою даного розділу є забезпечення стабільної роботи безпілотника в умовах високих електромагнітних завад, що важливо для успішного виконання завдання прототипу.

3 ПРОЦЕС СКЛАДАННЯ ПРОТОТИПУ ДРОНУ

3.1 Процес виготовлення прототипу

Залежно від поставленого завдання, необхідно розробити прототип безпілота, вибір прийшовся саме на FPV дрон, оскільки його наразі реально зібрати самостійно, відповідно і ціна дозволяла це реалізувати, тому було вирішено вибрати наступні компоненти:

- рамка Mark4 – рама Readytosky, оснащена рЕМВнцем для кріплення акумулятора довжиною 30 см;
- SpeedyBee f405v3bls50a30x30fc і ESC Stack – включає в себе регулятор швидкості (ESC) і контролер польоту (FC) для забезпечення стабільного управління дроном;
- двигун серії EMAX ECOII – 4S1700KV, безщітковий двигун в FPV-системах і в саморобних безпілотних проектах завдяки своїй високій продуктивності;
- камера Caddx Ratel2V2FPV, оснащена об'єктивом 2,1 мм, дозволяє перемикатися між форматами 16: 9/4:3 і NTSC / PAL для забезпечення якості відео під час польоту FPV;
- FPV-передавач JHEMCU2.5W VTX5.8g40ch – забезпечує надійну передачу відеосигналу на великі відстані;
- оригінальна антена Foxeer Lollipop 4v4 з високим коефіцієнтом посилення, працює на частоті 5,7 Г і забезпечує високе посилення (2,6 дБі) для поліпшення якості відео;
- приймач ELRS MINI915 МГц RX SX1276EXPRESSLRS – це приймач дальньої дії для FPV і квадрокоптерів, що працює на частоті 915 МГц;
- пошукові маяки, полегшують пошук безпілота у разі втрати сигналу або аварійної посадки;

– передавач ELRS915 МГц, потрібен для роботи з більшістю пультів дистанційного керування, що працюють за протоколом ELRS2,4 ГГц. Radiomaster Pocket, Zorro, Jumper T-Pro: використовується з пультом дистанційного керування Bandit Nano;

– GPS-модуль Weitian модель be-220 – використовується для відстеження місця розташування безпілотної, забезпечуючи високу точність навігації;

– пропелер з кроком 3,5 дюйма, в комплект входять 10 пар пропелерів HQPROP7×3,5×3 7035, що підходять для безпілотних літальних апаратів FPV для фрістайлу і кінопідйомників.

Перераховані компоненти були обрані з урахуванням їх сумісності, надійності та відповідності цілям нашого проєкту. Вони забезпечують високу продуктивність, стабільність і точність управління дроном, що має вирішальне значення для успішного виконання поставлених завдань, відповідно до комплектації маємо візуальний макет фінального результату, наведений на рис. 3.1.

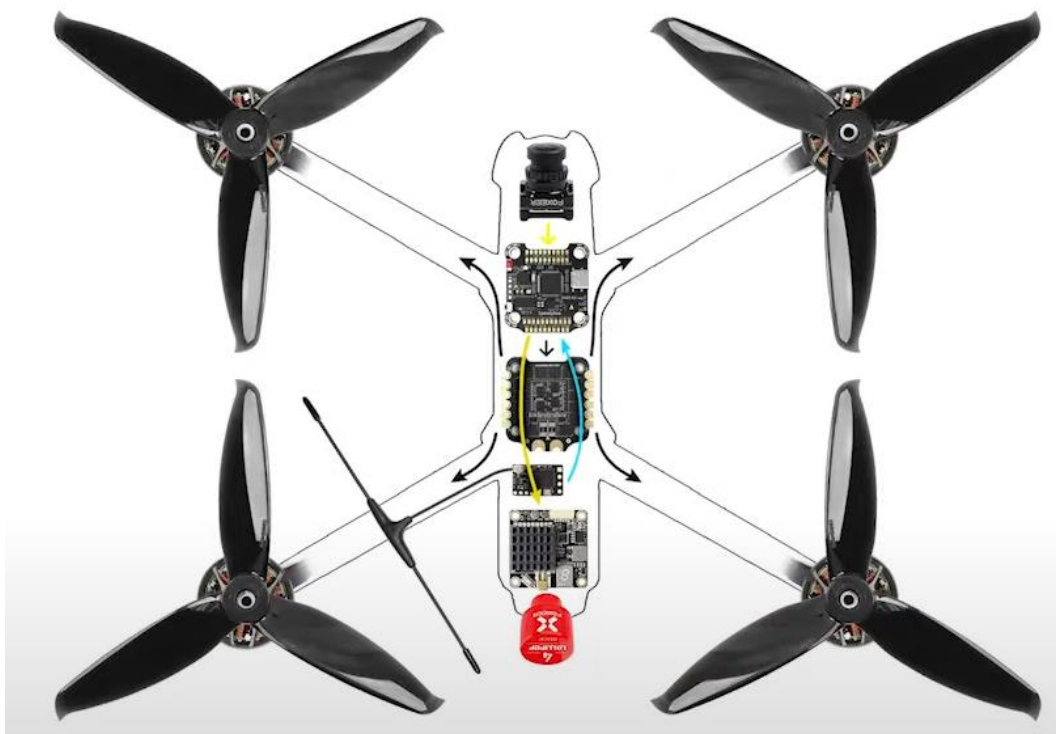


Рисунок 3.1 – Схема компонентів для складання дрону

Як батарея був обраний літій-іонний акумулятор FEi-6S2P 8000 мА·год.

Виходячи з поставлених цілей в 2 розділі почали складання дрону, та першим зібрали раму Mark4 (рис. 3.2) всі компоненти складання (рис. 3.3) етап складання.

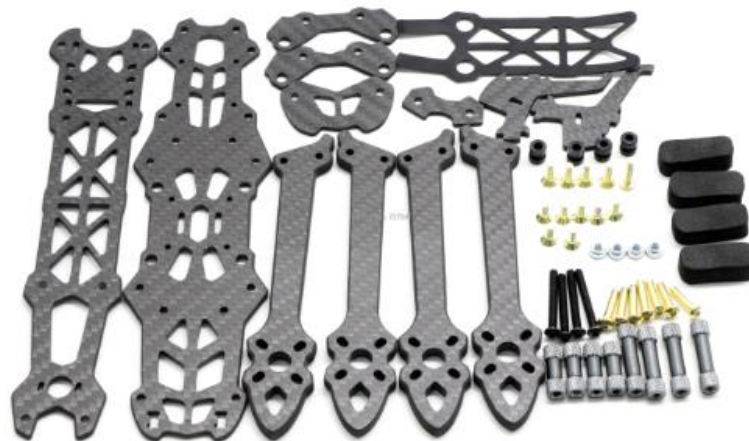


Рисунок 3.2 – Набір Mark4

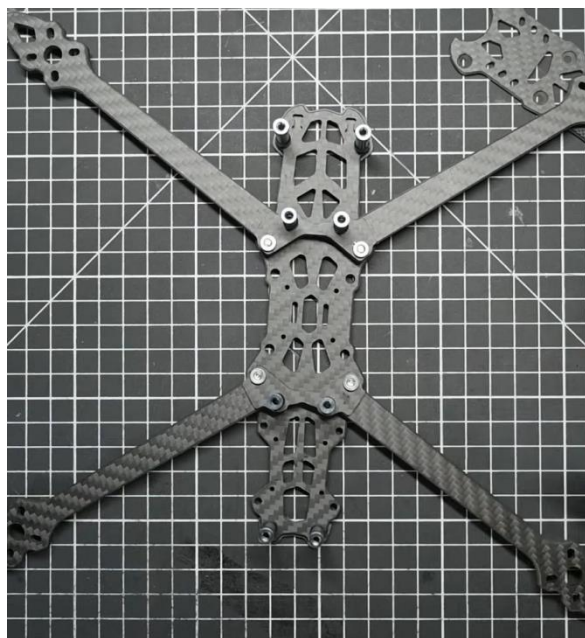


Рисунок 3.3 – Зібрана рама

Наступним кроком було кріплення 4 моторів на раму у відповідних для цього місця. Сам мотор має вигляд, представлений на рис. 3.4, містить вивід на

З дроти живлення, встановлення на раму було виконано за допомогою гвинтів з комплекту (рис. 3.5).



Рисунок 3.4 – Мотор серії EMAX ECOII Series ECO II

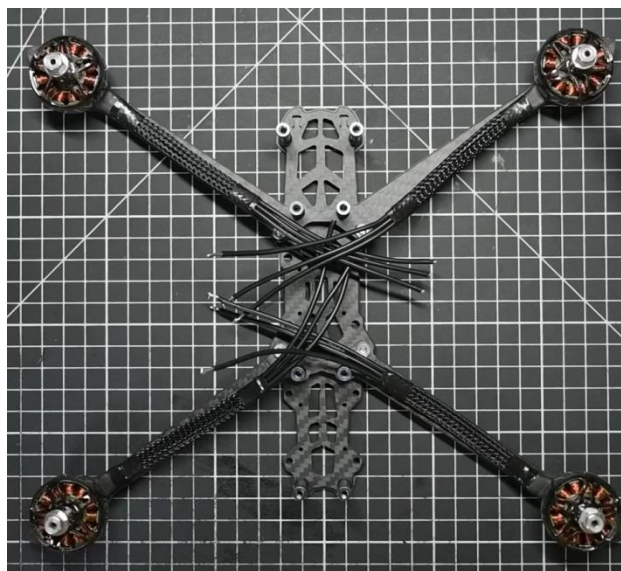


Рисунок 3.5 – Мотори на місцях кріплення

Наступним пунктом складання став регулятор обертів, обрали саме SpeedyBee F405 V3 BLS 50A 30×30 Стек FC і ESC, з'єднувач Type-C під'єднали до ПК, також в набір увійшли дроти живлення з акумулятором і кріплення з конденсатором (рис. 3.6 та рис. 3.7), на рис 3.8 наведено встановлення на раму одразу зі стеклом, та проведено одразу паяння силових дротів. Під час виконання паяння було прийнято рішення пустити силові дроти збоку від плат, а також

трішки змінити кут конденсатора для більш зручного подальшого встановлення акумулятора.



Рисунок 3.6 – Комплект Стек FC и ESC

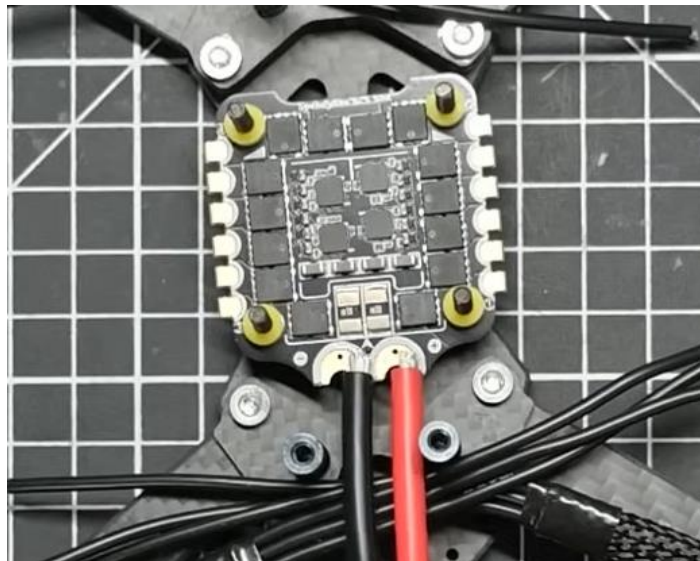


Рисунок 3.7 – Встановлення регулятора обертів



Рисунок 3.8 – Результат паяння конденсатора та силових дротів

Припаяли до стеку наші двигуни, для цього на платі є вказані місця (мітки по краях плати 1-2-3-4), самі дроти можна спаяти за схемою (це буде відповідати за напрямок руху двигунів), але тут немає різниці, оскільки в подальшому це все може бути відрегулювати на рівні програмування. Потім виконали контроль якості паяння, результат наведено на рис. 3.9.

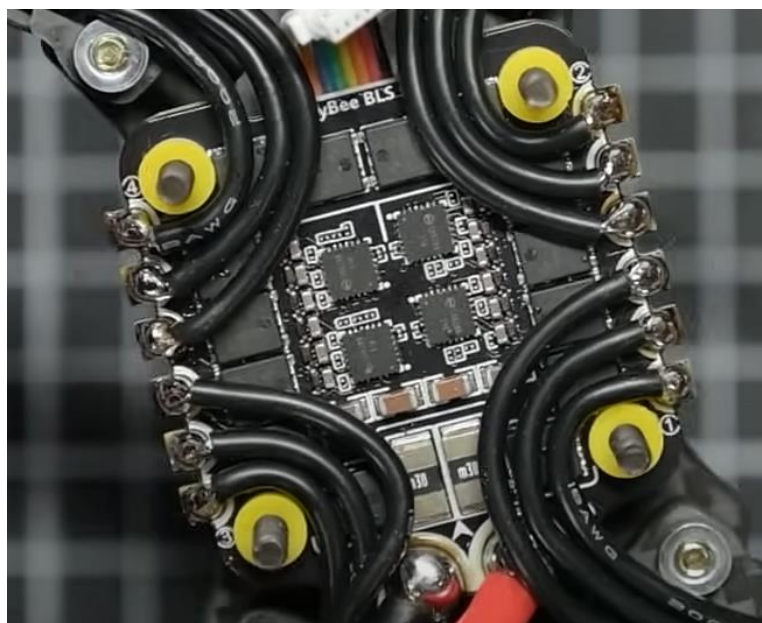


Рисунок 3.9 – Підключення моторів до плати

Далі зафіксували зверху польотний контролер та перевіри відстані між дротами та платами (рис. 3.10).

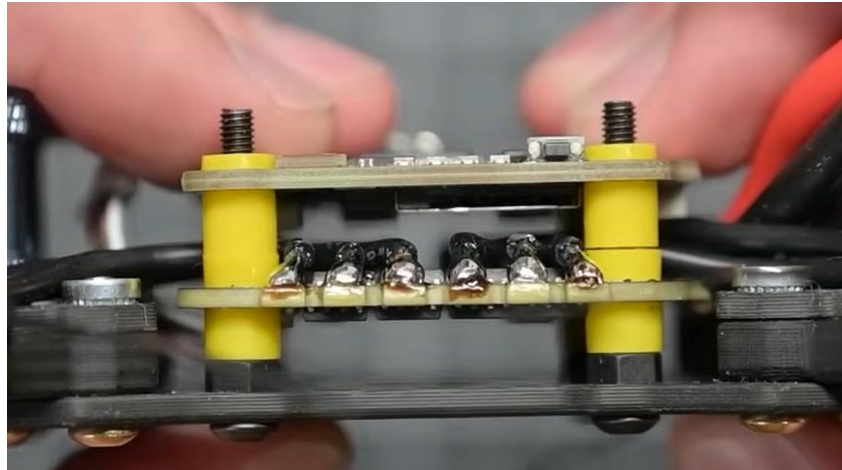


Рисунок 3.10 – Фіксація плат

Оскільки польотний контролер відповідає за з'єднання з іншими елементами, етап під'єднання камери, зумера, GPS, антени. Попередньо перевірено працездатність контролера за підключення до BetaFlight, щоб переконатися у роботі гіроскопу. Для цього скористалися зеднувачем Type C. Миготіння світлодіодів показано на рис. 3.11, а також віртуальна модель дрону, що відповідає на зміну положення плати, – на рис. 3.12, це означає справність даної моделі, а нам це дає змогу перейти до паяння наступних компонентів [11].

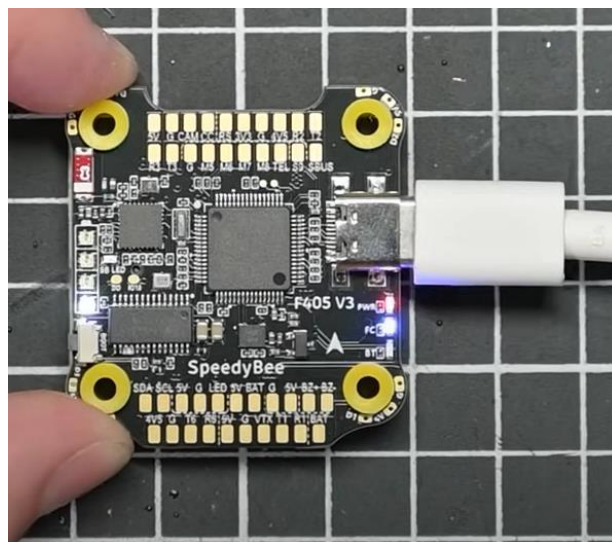


Рисунок 3.11 – Підключення до BetaFlight

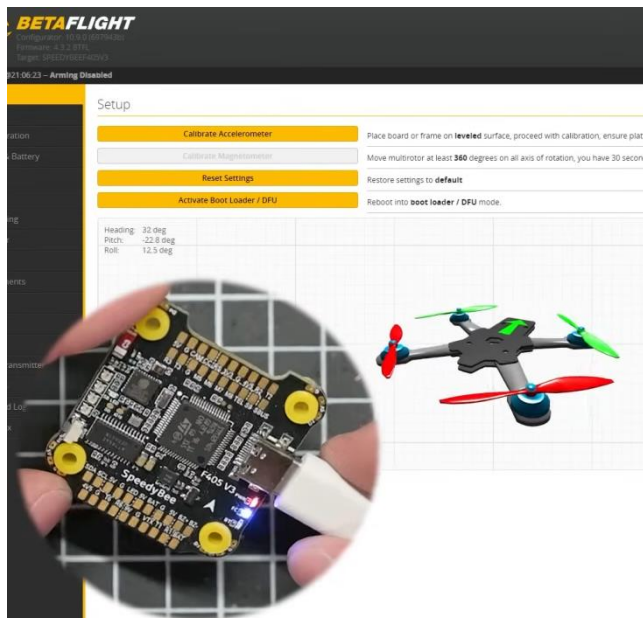


Рисунок 3.12 – Тест в контролера в BetaFlight

Попередньо маємо схему підключення, де було наглядно видно відповідні місця припайки для паяння інших елементів дрону, наведену на рис. 3.13.

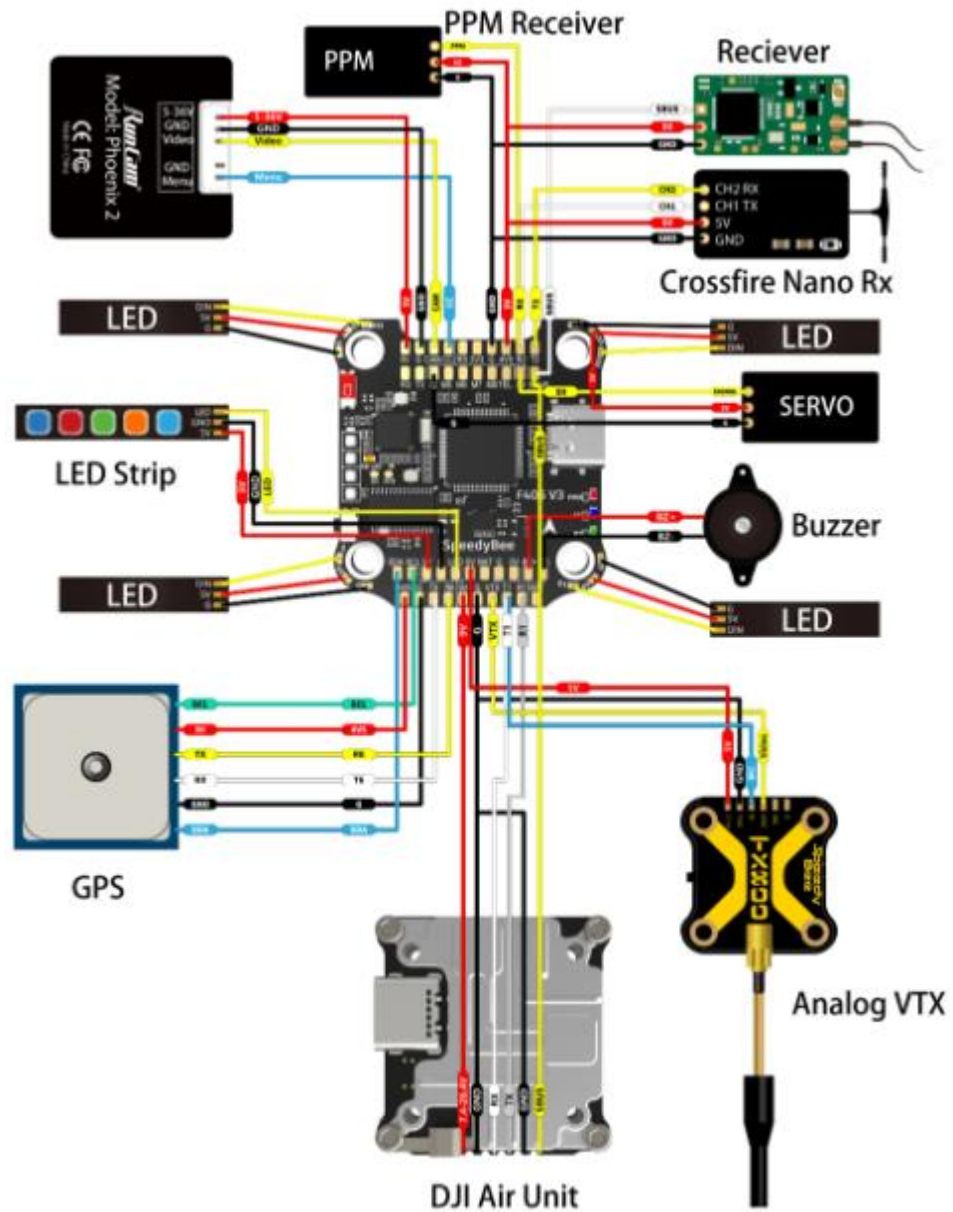


Рисунок 3.13 – Схема паяння польотного контролера

На схемі на рис. 3.13 модуль VTX був підключений до 5 В, але для даного випадку потрібна більша напруга, відповідно до комплектації дрону.

Вміст комплекту FPV Camera Drone наведено на рис. 3.14. Кріплення було здійснено в спеціально створене місце рами (рис. 3.15).



Рисунок 3.14 – Комплект FPV Camera Drone



Рисунок 3.15 – Встановлення камери в раму з Mark 4

Здійснено паяння 3 контактів (чорний – це земля, червоний +, жовтий – відеосигнал), чорний дріт відповідає G, червоний 5V, а жовтий CAM, рис. 3.16.

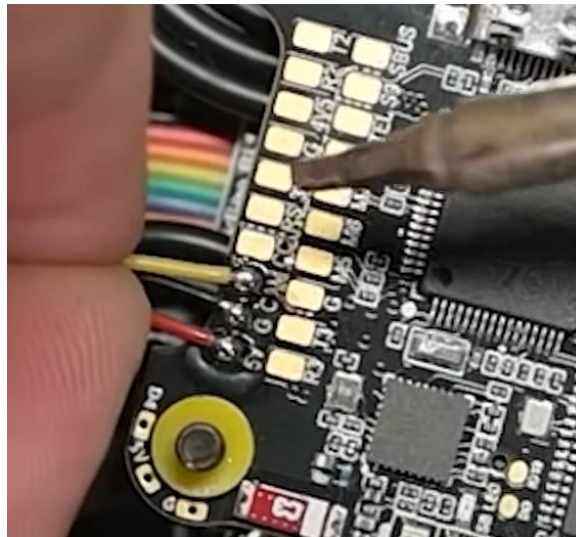


Рисунок 3.16 – Паяння камери

Підключення FPV-передатчика JHEMCU зображено на рис. 3.17, для цього приєднали дрiт зi складання та вiдповiдно до схеми виробника (рис. 3.18), припаяли до контролера (рис. 3.19), проте живлення i землю було видалено, оскiльки ними можна жити камеру, але в нашому модулi камера вже має особисте живлення.

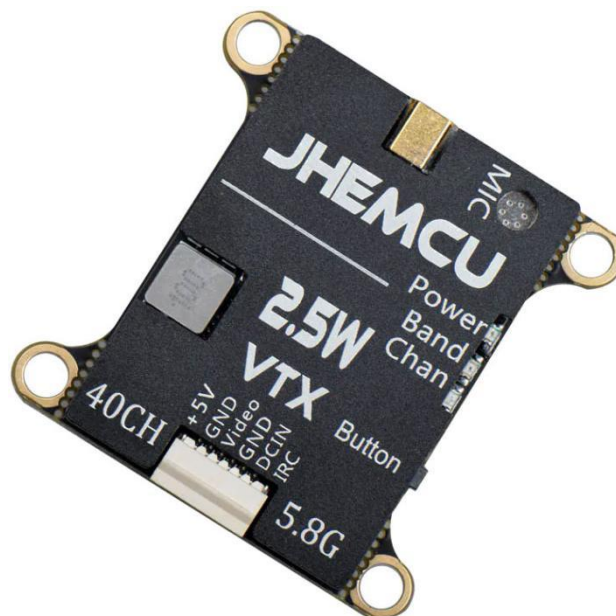


Рисунок 3.17 – FPV передавач JHEMCU

Пiд час з'єднання отримали такі пари зв'язку: дрiт IRC – T1, DCIN – 9V, GND – GND, Video – VTX, результат наведено на рис. 3.19.

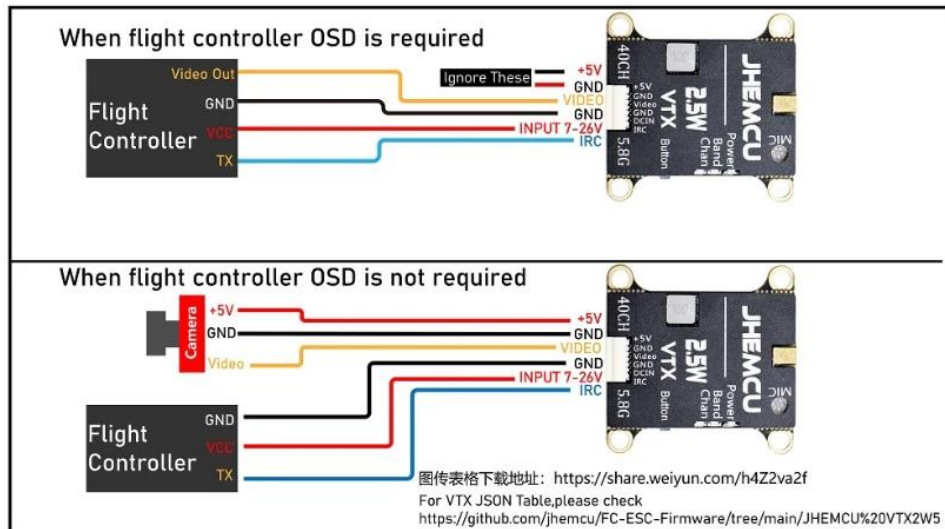


Рисунок 3.18 – Схема підключення передавача

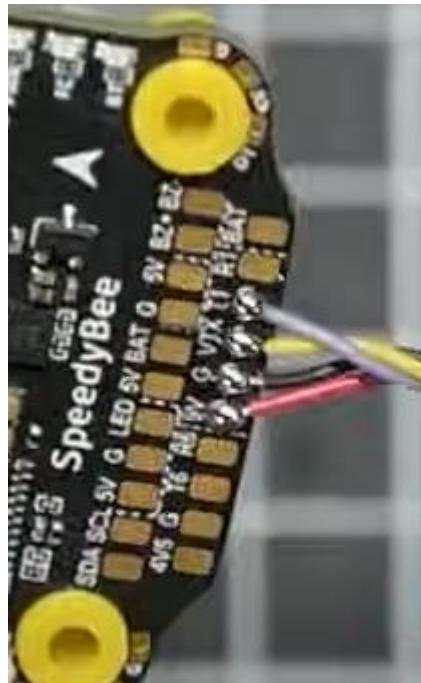


Рисунок 3.19 – Результат паяння відеопередавача VTX

Модуль Veitian GPS (рис. 3.20) встановлюється для перегляду швидкості польоту, показники пройденої дистанції, відстані від точки взльоту. Для цього компоненту є окреме кріплення, що встановлюється на задній частині дрону (рис. 3.21). Паяння відбулося контактами RX – R6, TX – T6, GND – GND, 5V – 4V5 (рис. 3.22).



Рисунок 3.20 – Модуль Veitian GPS



Рисунок 3.21 – Підключення GPS-модуля

Приймач ELRS MINI 915Mhz RX SX1276, комплект компонентів зображений на рис. 3.22, в даному випадку паяється TX приймача на RX польотного контролера і навпаки RX приймача на TX контролера. У випадку, якщо їх припаяти не в цій послідовності, то приймач не буде працювати. Було прийнято рішення розташувати приймач у передній частині на верхній панелі біля камери, тому що антена кріпитиметься до однієї з ніжок (рис. 3.23).



Рисунок 3.22 – Комплект приймача

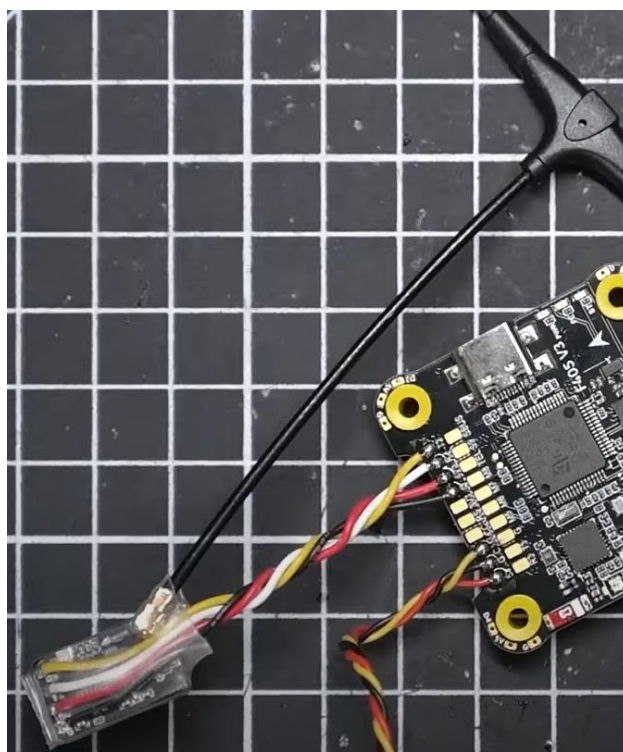


Рисунок 3.23 – Приймач

Для отримання звукових сигналів дрону приєднуємо Buzzer 100dB (рис. 3.24) місце на платі (рис. 3.25). Мали 3 драти, живлення та землю, головний з них йде на керування, тобто BZ- – це сигнал, живлення 5 В, проте BZ+ – також живлення, тому прийнято рішення контакт сигналу, а живлення і землю припаяти на окремі контакти розміщенні збоку.



Рисунок 3.24 – Бuzzer

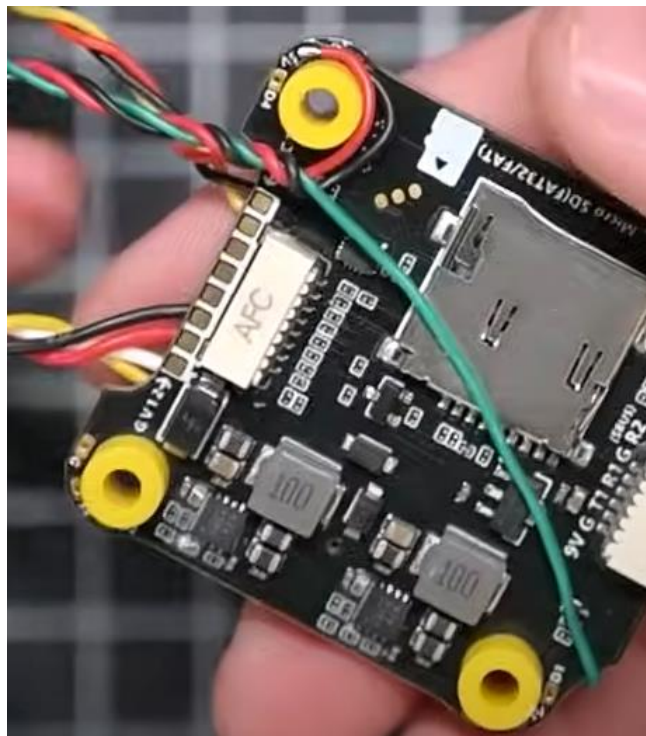


Рисунок 3.25 – Контакти бузера

Після попередніх дій, з'єднуємо дві плати, контролера польоту (рис. 3.27). Подовжувач для антени роздрукували на принтері взявши дані з інтернет джерела. Маємо наступну модель, показану на рис. 3.26.



Рисунок 3.26 – Деталь кріплення

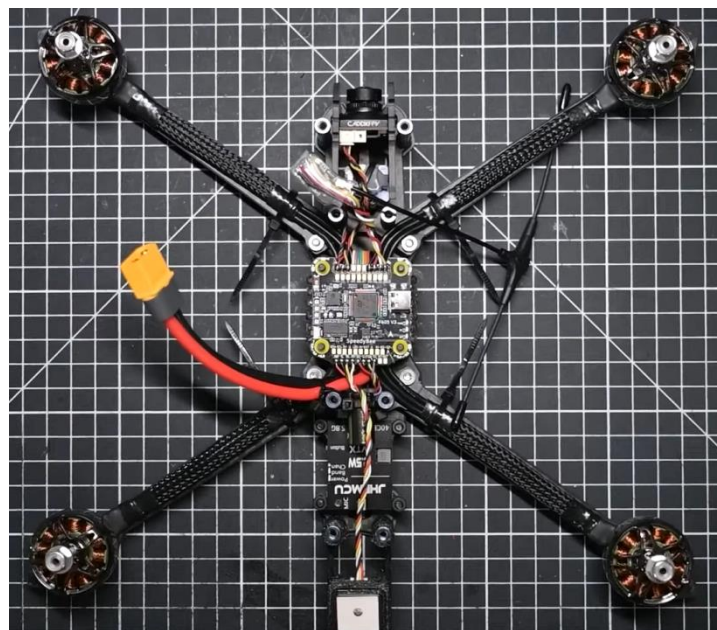


Рисунок 3.27 – Під'єднання всіх компонентів

Наступним кроком була перевірка контактів, а точніше перевірка всіх раніше з'єднаних компонентів (рис. 3.28) перед підключенням батареї, оскільки збиралося це в домашніх умовах, можливості використання приладу Smoke Stopper, для перевірки і контролю навантаження, не було і це була єдина спроба.

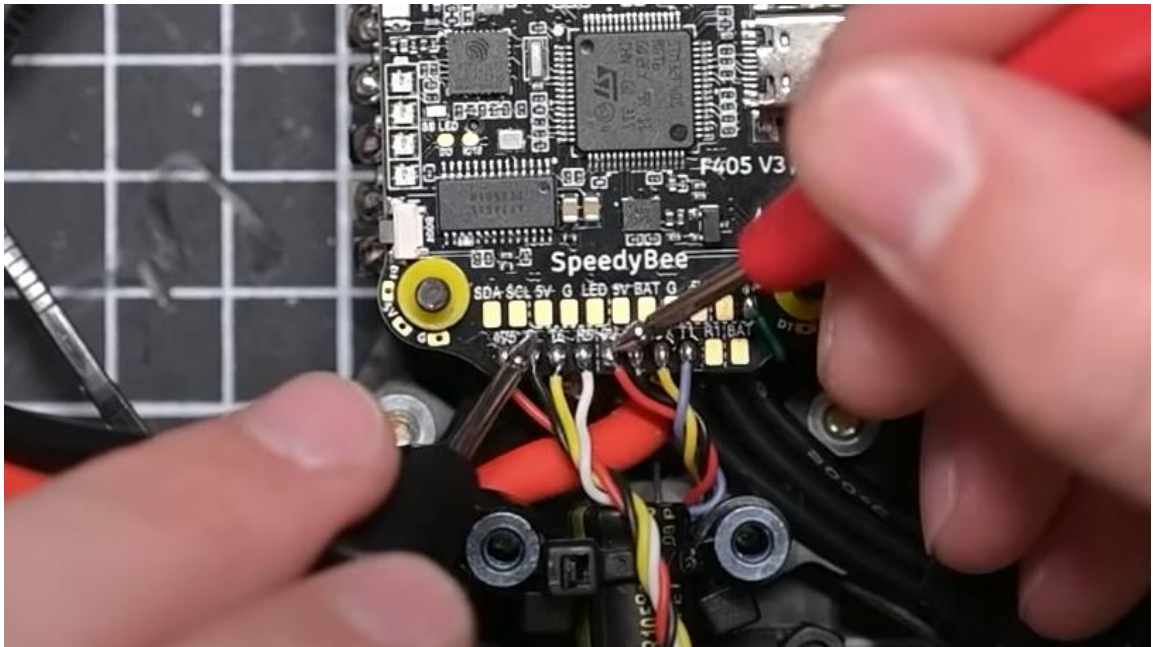


Рисунок 3.28 – Перевірка перед запуском

З'єднавши контакти з батареєю, всі світлодіоди подали сигнал, також увімкнувся бужер, ніяких візуальних слідів замикання та запахів горіння не було помічено (рис. 3.29).

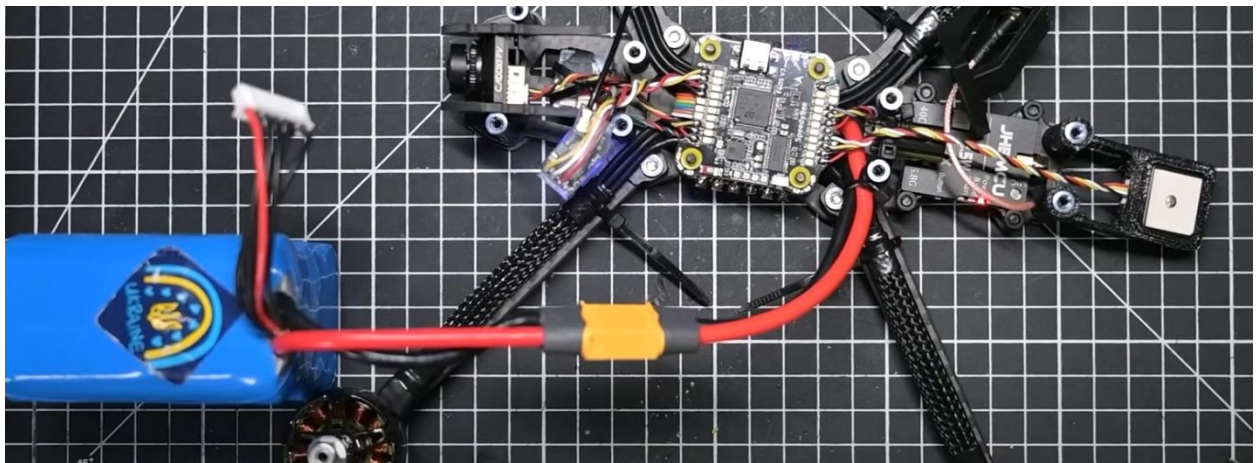


Рисунок 3.29 – Приєднання батареї

Завершуючий етап – кріплення верхньої рами та встановлення пропелерів (рис. 3.30).



Рисунок 3.30 – Фінальне складання

3.2 Прошивка дрону

Після збору дрону почалася стадія прошивки, для цього на персональному комп'ютері під'єдналися через з'єднання Type-C та встановили необхідні драйвери для розпізнання нашого пристрою у програмному забезпеченні BetaFlight, бекап робити не будемо, оскільки дрон новий, якщо були вже якісь стандартні налаштування, то можна було б зробити даний процес. На даному етапі оновили прошивку та автоматично визначили, який саме тип дрону маємо, за допомогою функції BetaFlight (рис. 3.31). Стара прошивка була версією 4.3.2 (рис. 3.32), яку змінили на 4.4.2.

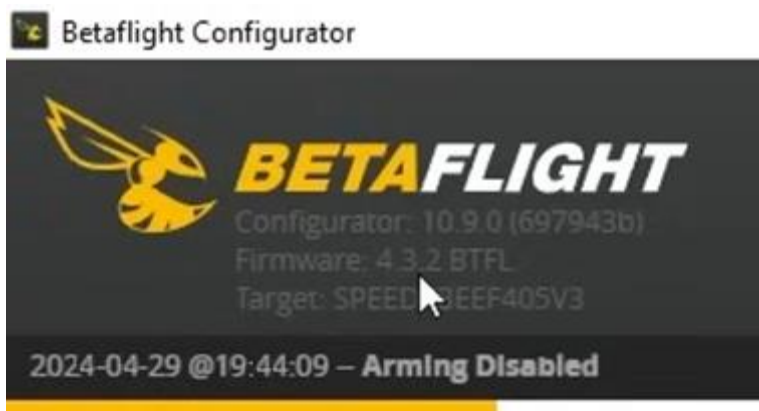


Рисунок 3.31 – Стара прошивка BetaFlight

Show release candidates
 SPEEDYBEEF405V3 Auto-detect
 4.4.2 [01-Jun-2023]
 No reboot sequence
 Full chip erase
 Manual baud rate 256000

Рисунок 3.32 – Нова прошивка

Firmware Flasher

Show release candidates
 SPEEDYBEEF405V3 Auto-detect
 4.4.2 [01-Jun-2023]
 No reboot sequence
 Full chip erase
 Manual baud rate 256000

Core Only Build Configuration
 Radio Protocol: CRSF,GHST,SBUS
 Telemetry Protocol: [None]
 Motor Protocol: DSHOT
 Other Options: GPS LED Strip OSD (SD) OSD (HD) Pin IO VTX

Please do **not** try to flash **non-Betaflight** hardware with this firmware flasher. Do **not** disconnect the board or **turn off** your computer while flashing.
Note: STM32 bootloader is stored in ROM, it cannot be bricked.
Note: **Auto-Connect** is always disabled while you are inside firmware flasher.
Note: Make sure you have a backup; some upgrades/downgrades will wipe your configuration.
Note: If you have problems flashing **try disconnecting all cables from your FC** first, try rebooting. **up**
Note: When flashing boards that have directly connected USB sockets (most newer boards) ensure you installed
IMPORTANT: Ensure you flash a file appropriate for your target. Flashing a binary for the wrong target

Рисунок 3.32 –Дрон і його комплектація

Також змінили радіопротокол, оскільки приймач ELRS працює на протоколі CRSF, в додаткових опціях, крім перелічених, додали сервоприводи, після цього зібрали прошивку (рис. 3.33).

Core Only Build Configuration
 Radio Protocol: CRSF
 Telemetry Protocol: [None]
 Motor Protocol: DSHOT
 Select commit: [None]
 Other Options: GPS LED Strip OSD (SD) OSD (HD) Pin IO Servos VTX

Release and Build info
 Target: SPEEDYBEEF405V3 [HWI]
 Manufacturer ID: SPBE
 Version: 4.4.2
 MCU: STM32409
 Date: 01-Jun-2023 00:00
 Configuration Filename: [default]

Cloud Build Details: Show Log
 Status: Success (cached)

Recovery / Lost communication
 If you have lost communication with your board follow these steps to restore communication:
 • Power off
 • Enable 'No reboot sequence', enable 'Full chip erase'
 • Jumper the BOOT pins or hold BOOT button.
 • Power on (activity LED will NOT flash if done correctly).
 • Install all STM32 drivers and Zadig if required (see **USB Flashing** section of Betaflight manual).
 • Close configurator, Restart Configurator.
 • Release BOOT button if your FC has one.
 • Flash with correct firmware (using manual baud rate if specified in your FC's manual).
 • Power off.
 • Remove BOOT jumper.
 • Power on (activity LED should flash).
 • Connect normally.

Programming **SUCCESSFUL** Exit DFU mode Flash Firmware Load Firmware (Online) Load Firmware (Local)

Рисунок 3.33 – Завершення прошивки

Далі увімкнули дрон, в наступному вікні обрали стандартні налаштування для більш зручної роботи з подальшими корегуваннями, інакше майже всі налаштування портів були пустими, тому обрали необхідний пакет налаштувань (рис. 3.34). Відповідно з'явилася коректна кількість портів (рис. 3.35).

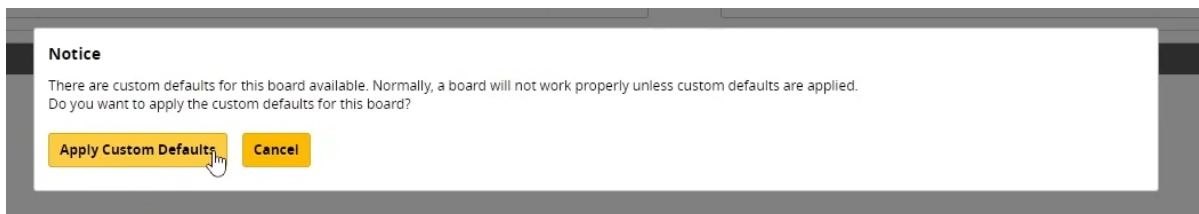


Рисунок 3.34 – Вибір налаштувань

Ports wiki

Note: not all combinations are valid. When the flight controller firmware detects this the serial port configuration will be reset.
Note: Do NOT disable MSP on the first serial port unless you know what you are doing. You may have to refresh and erase your configuration if you do.

Identifier	Configuration/MSP	Serial Rx	Telemetry Output	Sensor Input	Peripherals
USB VCP	<input checked="" type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled AUTO	Disabled AUTO	Disabled AUTO
UART1	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled AUTO	Disabled AUTO	Disabled AUTO
UART2	<input type="checkbox"/> 115200	<input checked="" type="checkbox"/>	Disabled AUTO	Disabled AUTO	Disabled AUTO
UART3	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled AUTO	Disabled AUTO	Disabled AUTO
UART4	<input checked="" type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled AUTO	Disabled AUTO	Disabled AUTO
UART5	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled AUTO	ESC AUTO	Disabled AUTO
UART6	<input type="checkbox"/> 115200	<input type="checkbox"/>	Disabled AUTO	Disabled AUTO	Disabled AUTO

Рисунок 3.35 – Стандартне налаштування портів

Перевірили положення дрону та виконали калібрування за акселерометром, для цього вручну нахилили дрон у різні боки та наглядали за площиною (рис. 3.36), водночас спостерігали за фізичною моделлю (рис. 3.37). У нашому випадку акселерометр налаштований правильно, в конфігурації ми не змінили нахил дрону по осях.



Рисунок 3.36 – Модель нахилу дрону в BetaFlight

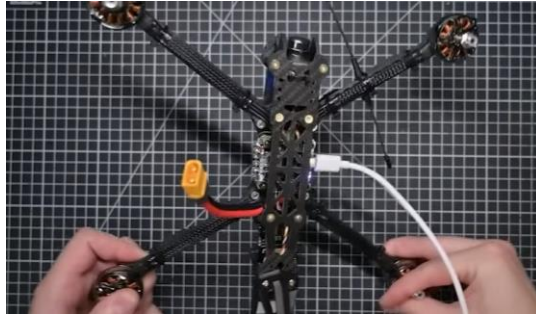


Рисунок 3.37 – Перевірка нахилу дрону

Порти R2 – T2 становлять порт UART2, а R6 – T6 відповідно UART6, за відсутності GPS-модуля був припаяний приймач, то було б потрібно включити приймач на UART6, але нам більше підходить стандартне налаштування на порт UART2, оскільки саме туди був припаяний приймач. Також в UART може бути задіяна тільки одна опція, в іншому випадку підключення одночасно 2 опцій являє собою скидання даних з портів UART. UART1 приєднаний до відеопередавача і змінили його налаштування (рис. 3.38), обрали VTX (IRC Tramp), оскільки на етапі під'єднання компонентів мали контакт IRC.

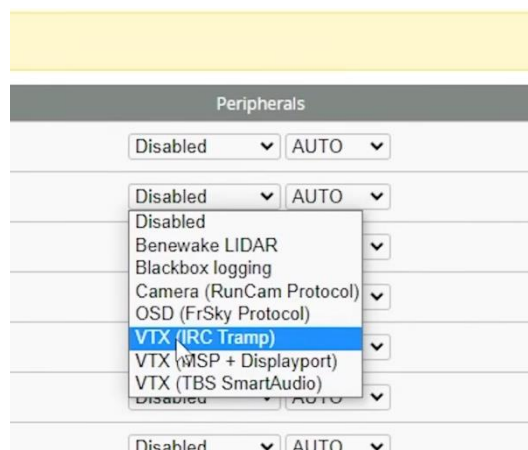


Рисунок 3.38 – Налаштування порту UART1

GPS-модуль припаяний на контакти, а R6 – T6, тому обрали в налаштування UART6, бітрейт був виставлений автоматично (рис. 3.39). Виконали збереження та перезавантаження, відповідно в меню став активний GPS-модуль (рис. 3.40).

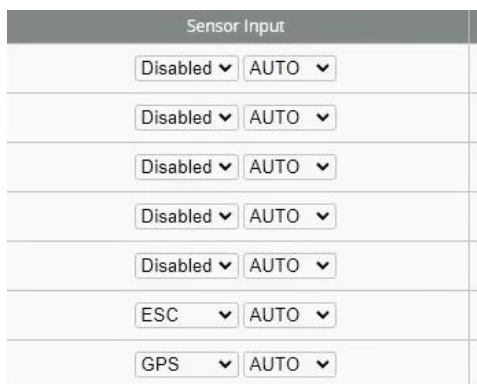


Рисунок 3.39 – Налаштування GPS

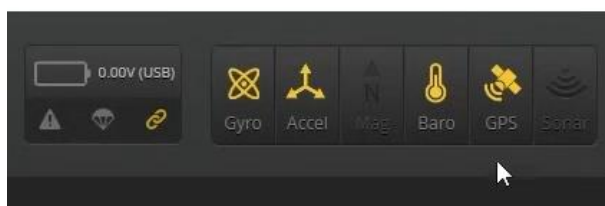


Рисунок 3.40 – Активний GPS-модуль

У вкладці «Конфігурація» дали назву дрону та змінили кут ARM з 25° до 180° для того, щоб процес активації моторів квадрокоптера міг виконати опцію Arm у будь-якому положенні, з одного боку це може бути не безпечно, якщо дрон знаходиться в руках, з іншого боку – це дасть змогу на недоступній відстані прямо в повітряному просторі почати активацію моторів (рис. 3.41). Інші налаштування лишили за замовчуванням (рис. 3.42).



Рисунок 3.41 – Назва та кут Arm

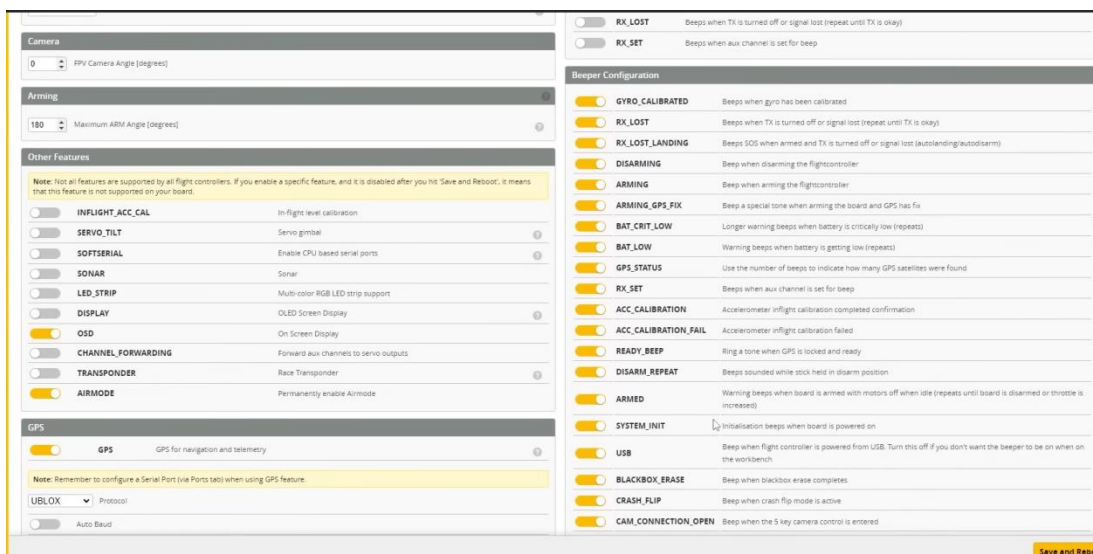


Рисунок 3.42 – Інші налаштування

Батарея являє собою літій-іонний акумулятор, у секції налаштування (рис. 3.43) змінили параметри появи попередження про низький рівень зарядки, яким став поріг напруги в 3,15 В, а мінімальна напруга починається від 2,9 В, до максимальної величини напруги 4,10 В.



Рисунок 3.43 – Налаштування батареї

У вкладці Failsafe увімкнули параметр повернення дрону через GPS та лишили значення за замовчуванням, далі вже під час самої роботи можна буде за необхідності змінити відстань повернення до точки старту, оскільки за межами обраної дистанції у 15 м дрон може впасти замість лояльного повернення, налаштування наведено на рис. 3.44.

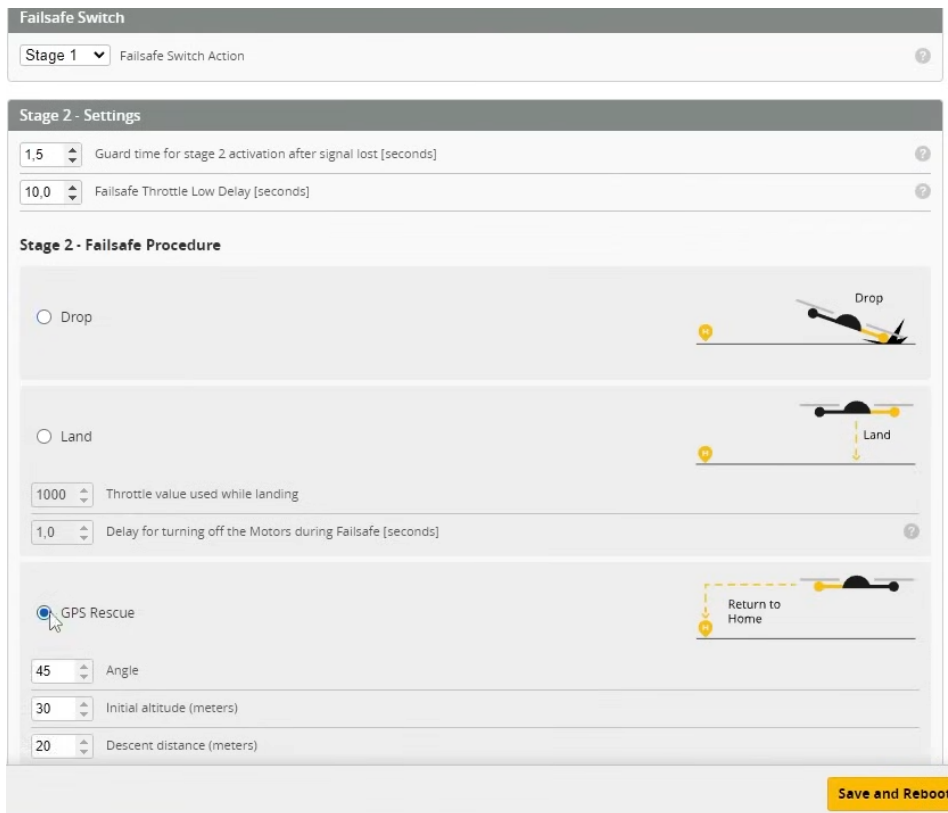


Рисунок 3.44 – Налаштування опції Failsafe

Приймач підключений до порту UART 2, прошивку лишаємо ту ж саму, перевірили роботу з пультом управління, відповідно з'ясували його справність та лишили налаштування за замовченням, як показано на рис. 3.45.

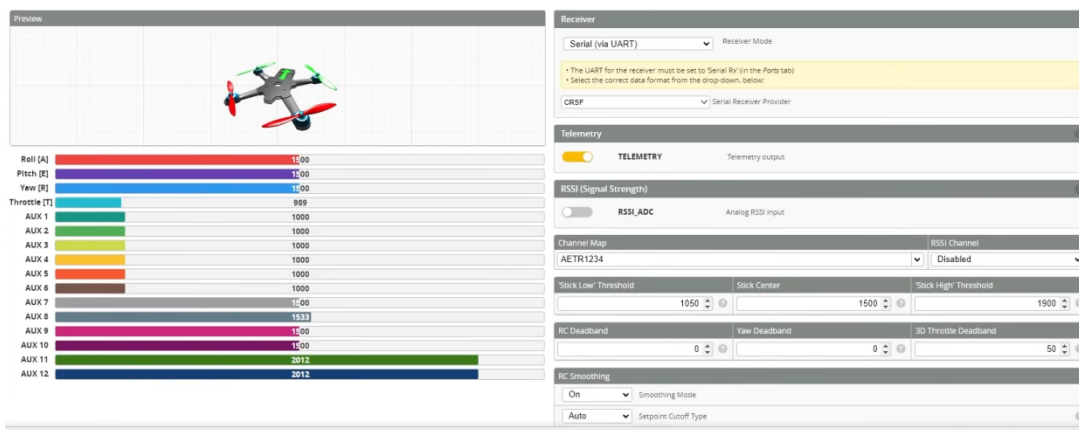


Рисунок 3.45 – Налаштування приймача

Налаштування ARM, перемикач на джойстику управління та змінили налаштування (рис. 3.46) появи функції ARM, відповідно до переведення перемикача AUX 1 у верхнє положення (рис. 3.47).



Рисунок 3.46 – Налаштування перемикача ARM



Рисунок 3.47 – Перемикач для функції ARM

Angle – опція для вирівнювання зв'язку з коптером, якщо він втрачений, то відповідне активування AUX 4 дасть змогу дрону вирівнятися та прийняти положення для знаходження зв'язку.

Повернення на початкову точку дрону буде виконано через GPS-модуль і виведено канал AUX 2. Бuzzer поставили на канал AUX 3. Загальні налаштування щодо опцій відповідно від натискання певного тумблера наведено на рис. 3.48.

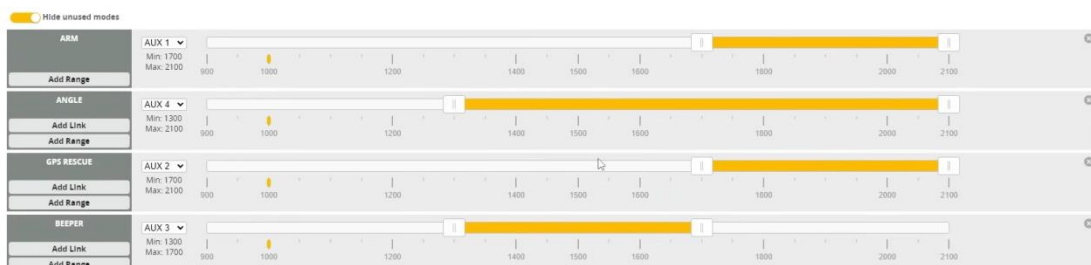


Рисунок 3.48 – Налаштування тумблерів пульта керування

Відеопередавач змінили за табличним значенням, щоб під час роботи з моторам його не перегріти. Знайдено на сайті виробника потрібний файл та завантажено частотні сітки та рівні потужностей (рис. 3.49). Канал потужностей був обраний Raceband, номер каналу 5, а сам показник потужності на 25 мВт – це для того, щоб під час підключення батареї відеопередавач працював на мінімальній потужності, а після процесу ARM виходив на вказану. Обрана мінімальна потужність до 1 ARM (рис. 3.50).

VTX Table										
5		Number of bands		8		Number of channels by band				
Name	Letter	1	2	3	4	5	6	7	8	
BOSCAM_A	A	5865	5845	5825	5805	5785	5765	5745	5725	Band 1
BOSCAM_B	B	5733	5752	5771	5790	5809	5828	5847	5866	Band 2
BOSCAM_E	E	5705	5685	5665	5645	5885	5905	5925	5945	Band 3
FATSHARK	F	5740	5760	5780	5800	5820	5840	5860	5880	Band 4
RACEBAND	R	5658	5695	5732	5769	5806	5843	5880	5917	Band 5

6 Number of power levels

Рисунок 3.49 – Завантажена сітка

Selected Mode

- Enter frequency directly
- RACEBAND Band
- Channel 5 Channel
- 25 Power
- Pit Mode
- 0 Pit Mode frequency
- On until first Low Power Disarm

Рисунок 3.50 – Зміна ARM

Зберігли налаштування та перезавантажили дрона, вимкнувши з'язок з баратареєю, по черзі блимали світлодіоди – це сигналізувало, в якому режимі працює відеопередавач (рис.3.51). Power – блимає 1 раз – це свічить про 1 рівень потужності, Band і Chanel блимають по 5 разів. Такий результат свідчить про коректне налаштування і про те, що все працює справно.

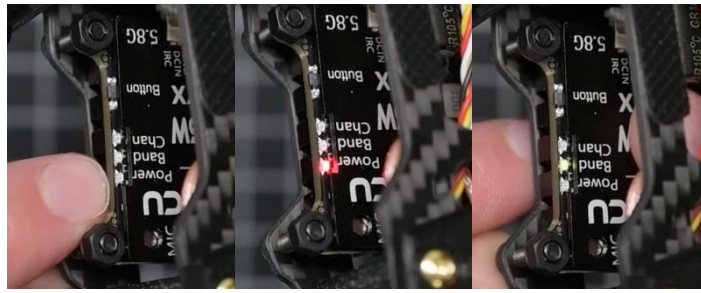


Рисунок 3.51 – Робота відеопередавача

Наступним кроком було налаштування моторів, для цього обрали необхідний тип моторів – QUAD X, та схема обертання зворотня, від камери та від антени. Протокол керування обрано DSHOT600, оскільки він гарантує більшу частоту надсилання сигналів, ніж на DSHOT150 (рис. 3.52). Саме таке рішення було прийнято, хоч іноді це може викликати перевантаження системи. Увімкнули функцію Bidirectional DShot, оскільки у системі є підтримка ESC, це дасть польотному контролеру дізнаватися, на якій частоті обертається кожен двигун, за допомогою цього більш можливо чітко відфільтровувати вібрації, які двигуни утворюють. Для цієї функції також важлива кількість магнітів двигуна.

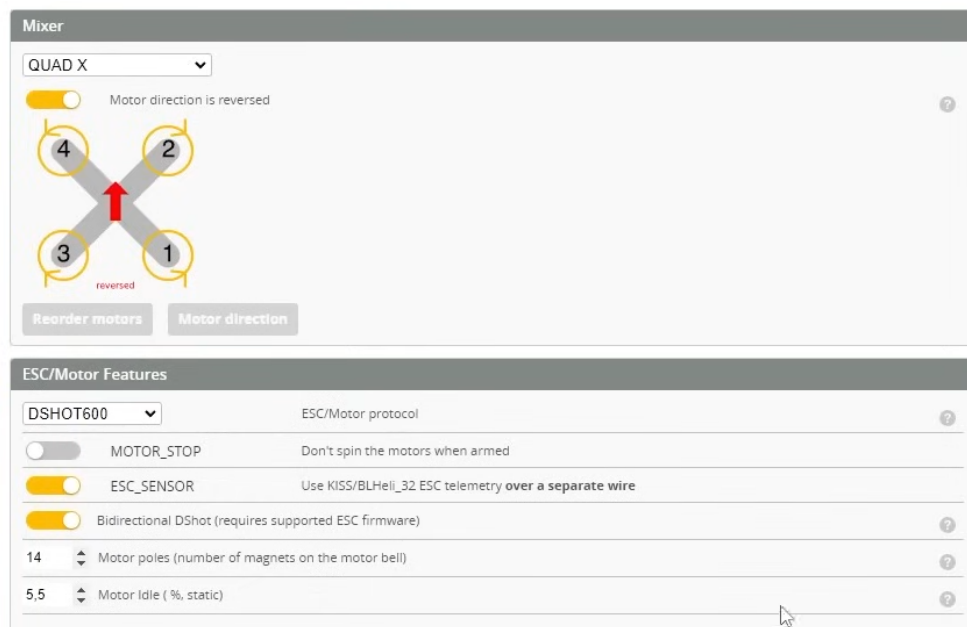


Рисунок 3.52 – Регулювання двигунів

Для запуску двигунів та коректної роботи, в програмі Bindedirectional DShot, перепрошили регулятор, було з'ясовано, що заводська прошивка цього не підтримує. Скористалися програмою BLHeli Configurator 1.2.0. Першим кроком було відключення від забезпечення BetaFlight та підключення живлення, у процесі стало зрозуміло, що одного модуля Type-C недостатньо. У завантаженій програмі з'ясували версію прошивки (рис. 3.53), після завантажили свою, а саме 16:9 BLheli_M Official (рис. 3.54), заздалегідь подбали про передавач, щоб він випадково не перегрівся. По завершенні лишили стандартні налаштування двигунів (рис. 3.55).

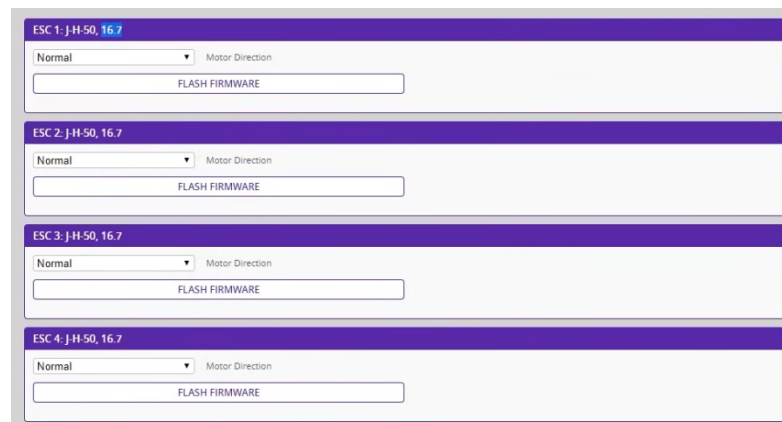


Рисунок 3.53 – Стандартна прошивка двигунів

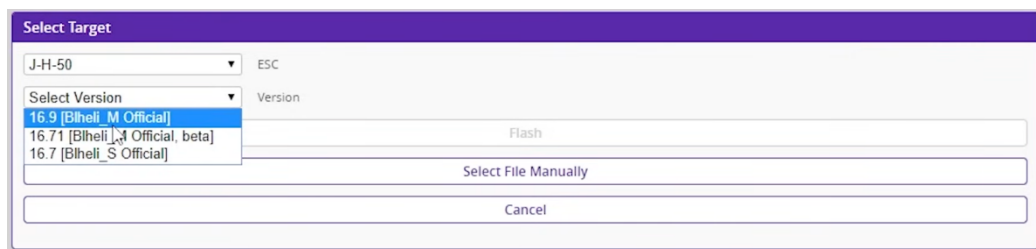


Рисунок 3.54 – Нова прошивка двигунів

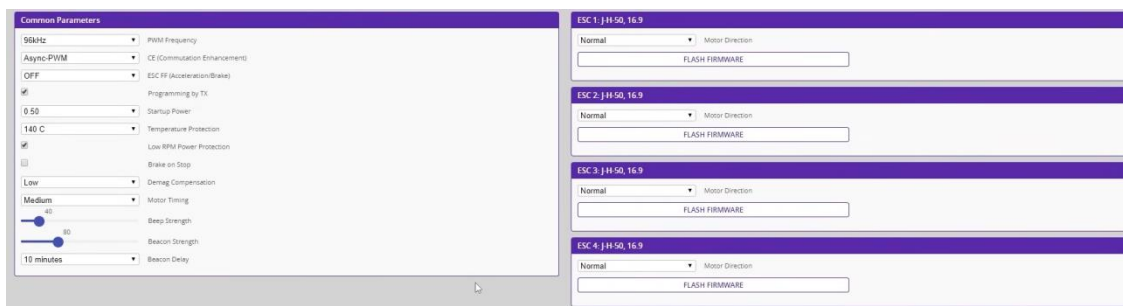


Рисунок 3.55 – Завершення налаштування двигунів

Потім повторно було підключено програму BetaFlight та перевірено роботу двигунів, польотний контролер отримує інформацію з двигунів, і наглядно видно, з якою частотою обертається кожен з 4 двигунів.

Отже, двостороння функція DShot працює (рис. 3.56) і польотний контролер отримує інформацію. Між тим, маємо рядок з E – це кількість отриманих помилок, яка сягає 0 %, хоч допустима помилка може бути до 1 %.

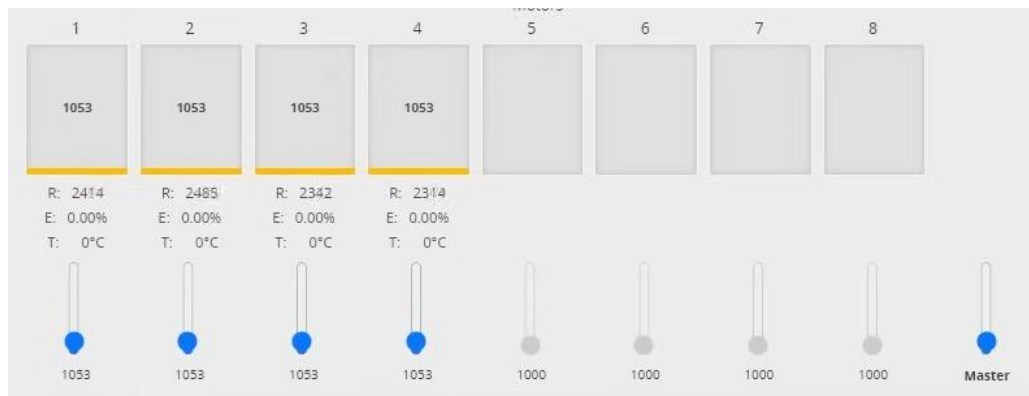


Рисунок 3.56 – Тест двигунів у середовищі BetaFlight

Далі було перевірено напрямок обертання, і вийшло, що лівий задній двигун обертається до антени, а правий – від антени, дана помилка виникла через зміну контактів під час паяння, тому змінено напрямок обертання в налаштуваннях.

Програмне забезпечення BetaFlight дає можливість скидання всіх напрямків обертання, що вважається за нову схему обертання, та опція «Індивідуальна зміна обертання», яка і була обрана (рис. 3.57), змінена схема обертання заднього лівого двигуна.

Налаштування фізичного впливу PID Tuning було взято з відкритих джерел, оскільки даний розділ містить багато параметрів фізичного впливу з зовнішнього середовища, тому прийнято рішення використати знання експертів та ввести параметри, зображені на рис. 3.58.

Motor Direction - **Warning: Ensure props are removed!**

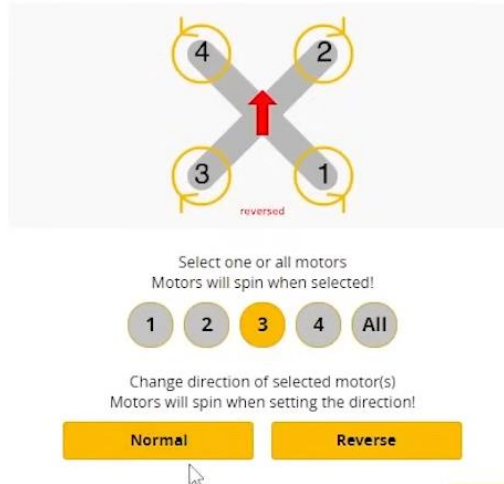


Рисунок 3.57 – Індивідуальна зміна напрямку обертання 3 двигуна



Рисунок 3.58 – Налаштування опцій дрону PID Tuning

Камера дрону як основне джерело відеоінформації, в налаштуваннях має три профілі візуальної передачі сигналу та додавання певних елементів виводу їх на екран. Виведено висоту в одиницях виміру в метрах без десятих, лише метри. Напряга акумулятора, компас та інші налаштування наведено на рис. 3.59.

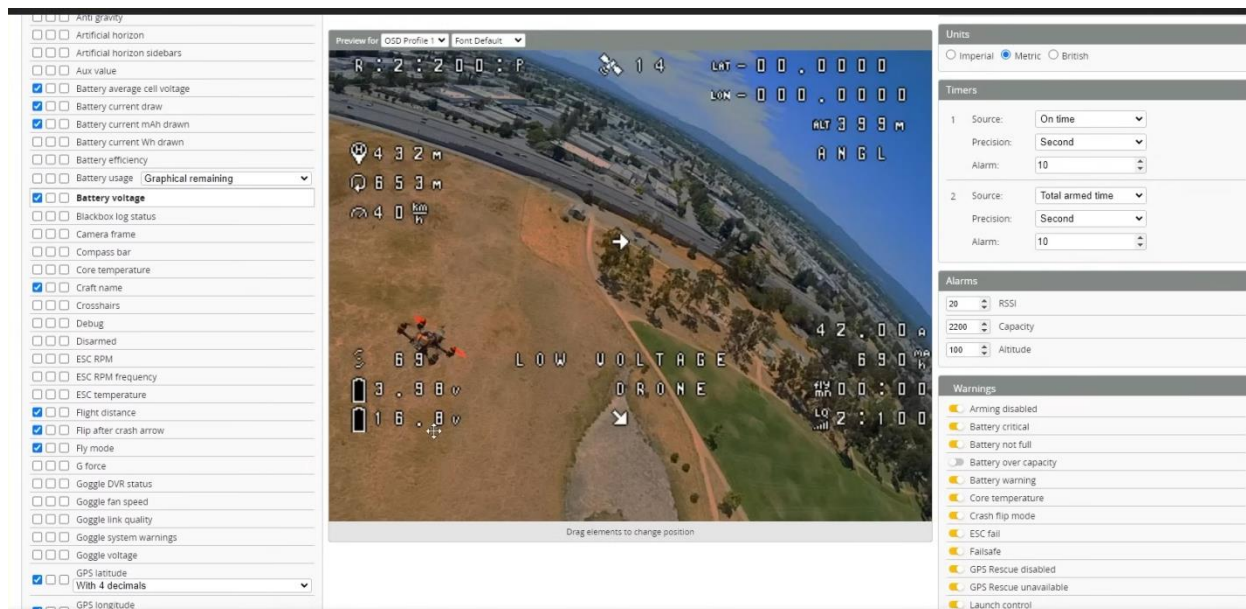


Рисунок 3.59 – Налаштування камери

По закінченню всіх прошивок і налаштувань проводимо пробний запуск і перший політ. На виході ніяких помилок не знайдено, все працює штатно (рис. 3.60). Сам пробний політ був не дуже вдалим через відсутність навичок керування та тим більше процедура нагадувала польову ситуацію (рис. 3.61).



Рисунок 3.60 – Пробний запуск



Рисунок 3.61 – Пробний тест польоту

3.3 Подолання електромагнітних перешкод

Під час тестування прототипу FPV-дрона в умовах міської інфраструктури ми зіткнулися з серйозними проблемами, пов'язаними зі стабільністю зв'язку. Міське середовище багате різними джерелами електромагнітних перешкод, що створило великі труднощі у підтримці надійного зв'язку між дроном та панеллю управління. У міських умовах стільникові мережі та численні бездротові інтернет-з'єднання працюють на частотах, близьких до частоти зв'язку безпілотної (5,8 ГГц для передачі відео і 915 МГц для управління), багато видів побутового та промислового обладнання генерують електромагнітне випромінювання, створюючи додаткові шуми та перешкоди для зв'язку. Металеві конструкції в сучасних будівлях можуть екранувати сигнали, викликати відбиття та перешкоди і ще більше знижувати якість зв'язку.

Щоб подолати проблеми, пов'язані з електромагнітними перешкодами, ми вирішили розробити та впровадити новий антенний модуль, який забезпечує кращу стабільність і дальність зв'язку.

Основними причинами вибору конструкції антенного модуля є вибір антени з високим коефіцієнтом посилення (рис. 3.62), оскільки розроблюваний модуль може значно збільшити потужність сигналу, що передається та приймається. Це допоможе подолати перешкоди, поліпшити якість зв'язку та знизити ймовірність втрати сигналур [12].

Направлені антени дозволяють концентрувати енергію сигналу в певних напрямках, зводячи до мінімуму вплив перешкод з інших напрямків. Це особливо важливо в міських умовах, де перешкоди можуть виникати з різних причин. Новий антенний модуль зменшує негативний вплив відбиття сигналу від металевих конструкцій та інших поверхонь, підвищуючи загальну якість зв'язку.

Одночасно вибір прийшовся і на підсилювач RadioMaster Bandit Micro EXPRESSLRS1W915 МГц, який може збільшити потужність сигналу, що передається з панелі управління, і забезпечити більш стабільне з'єднання навіть на великих відстанях в умовах високих перешкод.

У результаті виявлення проблем зі зв'язком в міській інфраструктурі було прийнято рішення розробити новий антенний модуль і впровадити підсилювач сигналу. Це значно покращує якість зв'язку між дроном і пультом управління, забезпечуючи стабільну та надійну роботу дрона навіть в умовах високих електромагнітних завад.

Підсилювач був обраний спеціально для пульта керування RadioMaster TX12 МКII (рис. 3.63), оскільки він має відповідний з'єднувач.

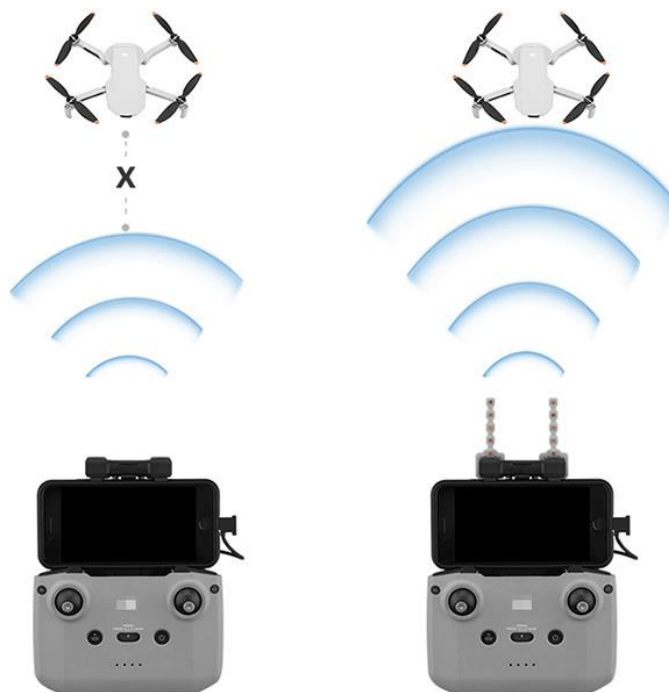


Рисунок 3.62 – Посилення зв'язку з дроном



Рисунок 3.63 – Пульт керування

Відповідно до перерахованих вище ідей маємо принцип роботи пристрою, що зображений на рис. 3.64.



Рисунок 3.64 – Принцип дії роботи пристрою

Оскільки вихід з відеопередавача до антени є портом SMA (рис. 3.65), почали з нього та обрали необхідний тип, а саме SMA (male).



Рисунок 3.65 – SMA порт

Далі обрано металеву пластину товщиною в 1,2 мм, розмірами 5 см × 5 см. Кабель – RG402 з хвильовим імпедансом в 50 Ом, сам вид проводу – коаксіальний, а смуга пропускання від 0 Гц до 12 Гц. Мідний дріт має діаметр 0,8 мм.

Вид антени обрано біквдрат кругової поляризації.

Знайдемо довжину хвилі за формулою (3.1).

$$\lambda = \frac{u}{v} . \quad (3.1)$$

Тож:

$$\lambda = 29800/5800 \text{ МГц} = 5,1379 \text{ см.}$$

Довжина секції a (1/4):

$$a = 7450/5800 = 1,2844 \text{ см.}$$

Відстань між елементами та пластиною, довжина секції b (1/8):

$$b = 3725/5800 = 0,6442 \text{ см.}$$

Довжина сторін дорівнює 2 довжинам хвилі, тобто щоб було 8 відрізків по 1/4 хвилі, потрібно їх збільшити на 8, виходить 10,26 см (дві довжини хвилі, перший відрізок мідного дроту).

Цей відрізок в 10,26 см потрібно загнути на 1,28 см відповідно до відстані між компонентами на кут 90° . У результаті маємо отримати результат, наведений на рис. 3.66. Після цього виконуємо перетворення до вигляду сегментів в формі 8. Слід зауважити, що підчас виконання та підрахунків слід зазначити необхідну точність дій, щоб у результаті відповідно до розрахунків отримати бажану частоту та підсилення 10 дБ [13].

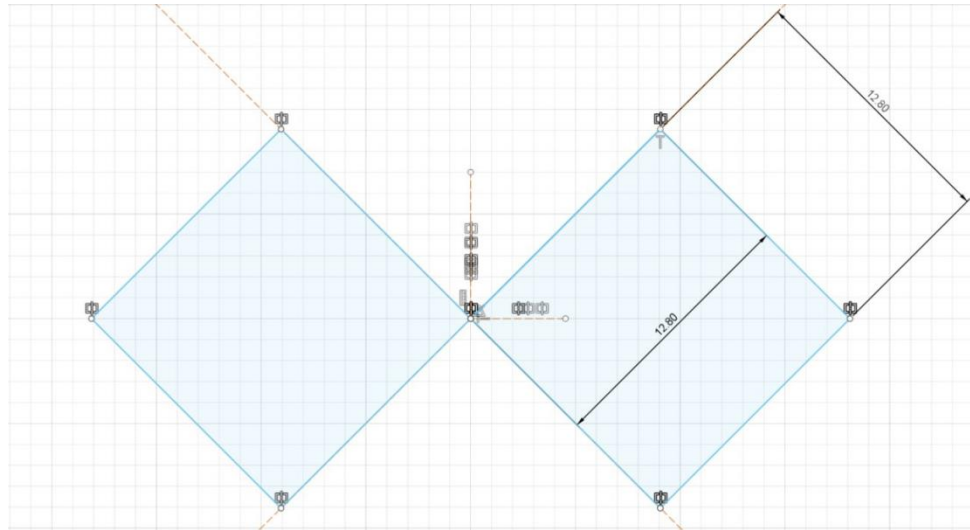


Рисунок 3.66 – Схема сигменту «8»

Виготовлення відбивача почалося з попередньо підготовленої мідної заготовки розмірами 5 см × 5 см (рис. 3.67).

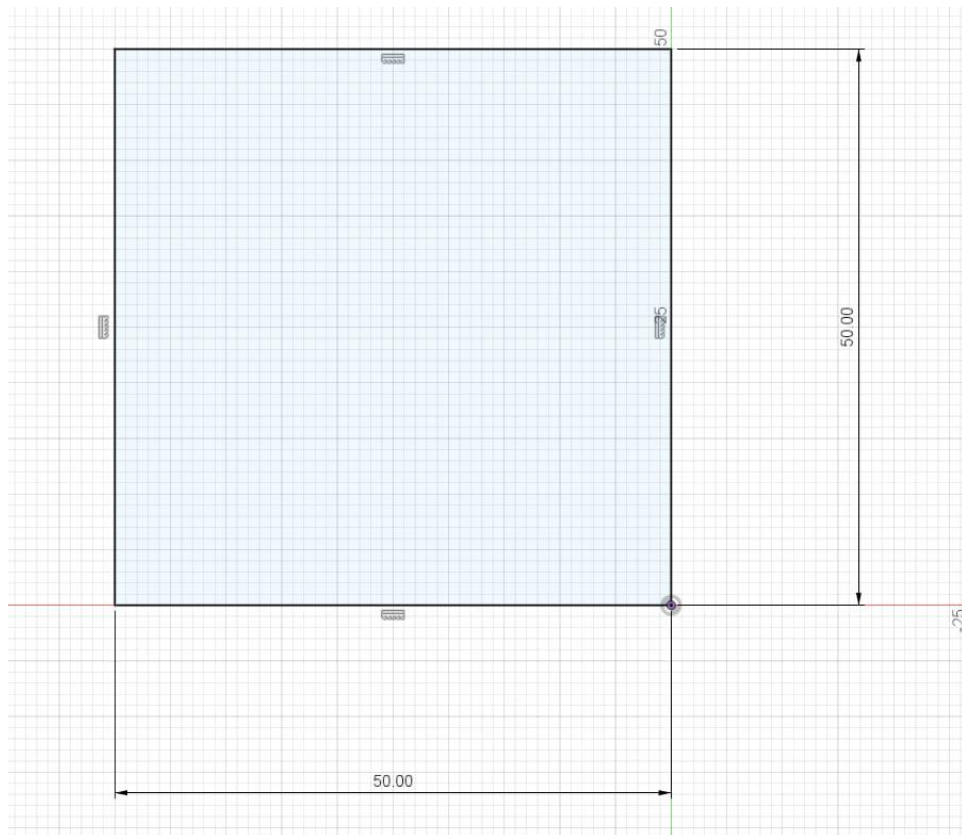


Рисунок 3.67 – Креслення мідної пластини

Встановили сегмент по центру нашої пластини та зробили отвори для кабеля RG402, а саме отвір для дротів діаметром 3,59 мм, і винесення сегменту на відстань 0,64 см від пластини за допомогою спеціальних кріплень (рис. 3.68), які були розміщені на пластині за допомогою фіксація через отвори діаметром 3,57 мм, результат виконаних дій на моделі наведено на рис. 3.69.



Рисунок 3.68 – Фіксація сегментів до мідної пластини

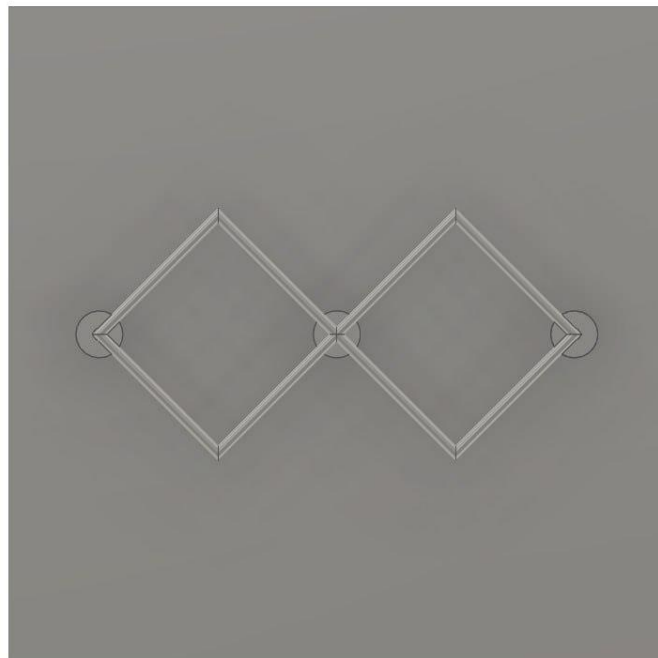


Рисунок 3.69 – Кріплення для сегменту

Зачистили кабель та проділи через раніше зроблений отвір для припайки до рефлектора, далі виконується пайка центрального мідного провіднику до біквдрату. Після обираємо необхідну довжину кабелю (в нашому випадку це 12 см) і монтуємо до конектора SMA (рис. 3.70), на виході отримали модель, наведену на рис. 3.71 [13].

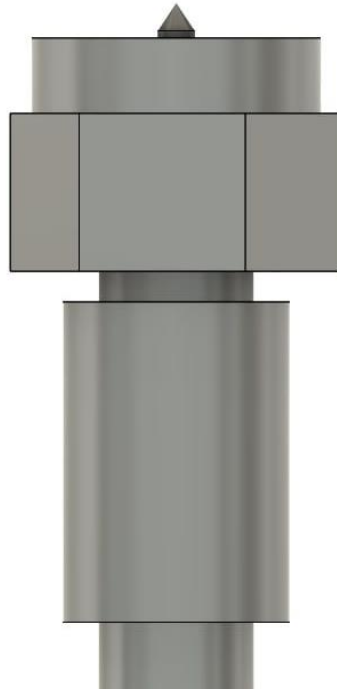


Рисунок 3.70 – Під'єднання переходника SMA



Рисунок 3.71 – Модель отриманої антени

Фінальним етапом після виготовлення провели заміри частот (рис. 3.72), необхідні нам частоти 5650-5750 Гц, при цьому коефіцієнт повернення втрат близько 1,3 [14]. Для замірів скористалися програмою RF Explorer Touch.

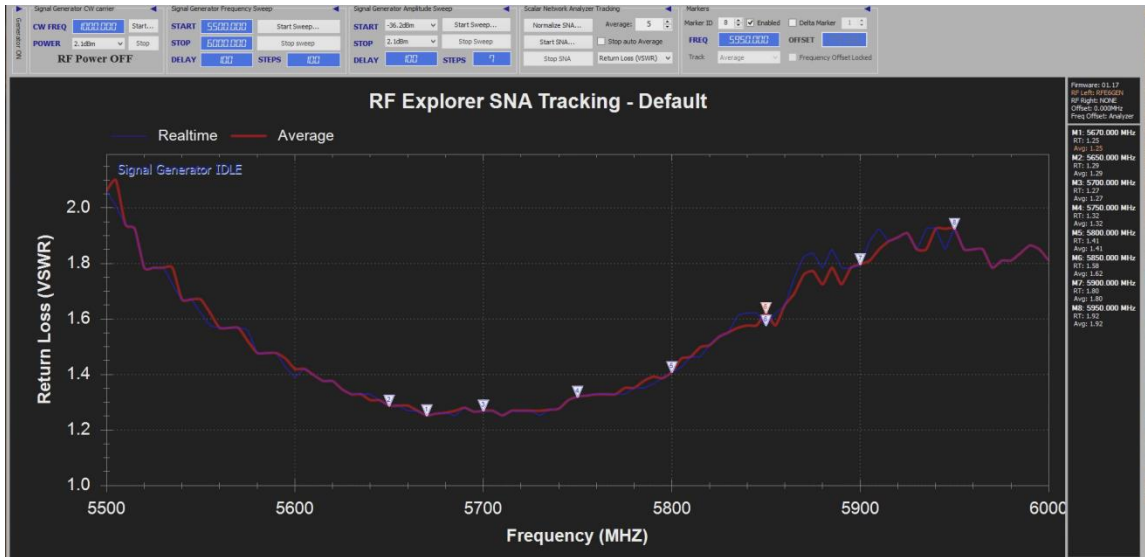


Рисунок 3.72 – Заміри в програмі RF Explorer Touch

Припустимо, що для стабільного зв'язку потрібна мінімальна потужність сигналу -90 дБм. Тоді відстань, на яку може полетіти дрон, можна оцінити за формулою Фріса для безперешкодної лінії зв'язку:

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) \quad (3.2)$$

За втрати вільного простору взяли загальну потужність 30 дБм (це підсилювач 1 Вт), 10 дБм (коефіцієнт підсилення нашої антени), а частота становить 915 МГц. Виконавши перетворення маємо:

$$P_r = 30 \text{ дБм} + 10 \text{ дБ} + 915 \text{ дБ} + 20 \log_{10}(0,05/4\pi \cdot x),$$

$$P_r = 955 + 20 \log_{10}(0,05/4\pi \cdot x),$$

$$\frac{0,05}{4\pi \cdot x} = \frac{0,05}{4\pi \cdot x},$$

$$\frac{0,05}{4\pi \cdot x} \approx \frac{0,05}{12,566 \cdot x},$$

$$\frac{0,05}{4\pi \cdot x} \approx \frac{0,003979}{x},$$

$$20\log_{10}(0,05/4\pi \cdot x) \approx 20\log_{10}(0,003979/x),$$

$$20\log_{10}(0,05/4\pi \cdot x) \approx 20(-27,02 - \log_{10}(x)),$$

$$20\log_{10}(0,05/4\pi \cdot x) \approx -540,4 - 20\log_{10}(x),$$

$$P_r = 414,6 - 20 \times \log_{10}(x).$$

Відповідно до отриманого значення знайшли оптимальну відстань з підтримкою безперервності зв'язку. Для цього починаючи з 500 м до 3000 м провели розрахунки:

Для $x = 0,5x = 0,5$ км (500 м); FSPL $\approx 325,058$ дБ.

Для $x = 1x = 1$ км; FSPL $\approx 334,6$ дБ.

Для $x = 3x = 3$ км; FSPL $\approx 345,06$ дБ.

Децибелі, які застосовуються для вимірювання втрат у вільному просторі (FSPL) або потужності сигналу в бездротових комунікаціях, показують, наскільки сильно зменшується сигнал під час передачі на певну відстань у вільному просторі, не враховуючи перешкод чи інших факторів.

Відповідно до отриманих результатів можна зробити такі висновки. Дані показують, що розроблена антена з коефіцієнтом підсилення близько 10 дБ і потужністю передачі 1 Вт. Тож в складних електромагнітних умовах, таких як умови міської забудови чи поруч з джерелом електромагнітних завад, можна розраховувати на стабільний зв'язок на відстані близько 2-3 км з урахуванням електромагнітних перешкод, але сама кількість перешкод буде значно меншою, оскільки частота передачі 915 МГц. Частота була підібрана для уникнення передачі інших трансляцій, таких як Wi-Fi і т. д., проте і не дійшла до частоти ліній зв'язку для літаків.

3.4 Заходи з охорони праці під час складання дрону

При роботі з електричними компонентами дрона, такими як підсилювачі та антени, необхідно використовувати інструменти з ізольованими ручками і дотримуватися правил поведження з електрообладнанням, що знаходиться під напругою. Слід регулярно перевіряти ізоляцію проводів і з'єднань, особливо в місцях пайки і з'єднань з такими компонентами, як антени. Треба уникати контакту з рухомими частинами, такими як пропелери. Встановлення захисних кожухів на пропелери може значно знизити ризик травмування. Також слід перевірити, що дрон стійко стоїть на рівній поверхні під час налаштування та тестування. Для безпечного налаштування використовували спеціальне кріплення або підставку.

Батареї, що використовуються в дроні, можуть містити небезпечні хімічні речовини, при їх використанні дотримувались інструкцій виробника, уникали механічних пошкоджень і не допускали перегріву та короткого замикання. Потрібно утилізувати використані батареї та інші компоненти, що містять небезпечні речовини, відповідно до вимог законодавства про охорону навколишнього середовища.

Всі електронні компоненти дрона, які можуть створювати електромагнітні перешкоди, були екрановані і заземлені для зменшення електромагнітних випромінювань. Тримали безпечну відстань від потужних джерел електромагнітного випромінювання, таких як антени базових станцій і радіопередавачів.

Робочі зони, де працювали з дроном та їх компонентами, були обладнані вогнегасниками або іншим протипожежним обладнанням, належним чином позначені та доступні. Контролювати температуру електронних компонентів, особливо під час заряджання акумуляторів та роботи підсилювачів, а для запобігання перегріву використовували температурні датчики та системи охолодження.

Перед кожним польотом проводили повну перевірку дрона, включаючи перевірку всіх з'єднань, стану акумуляторів і правильності налаштувань антен та

інших компонентів. Керували дроном тільки в безпечних умовах і уникали польотів в погану погоду, поблизу аеропортів, в густонаселених районах або інших зонах підвищеного ризику.

Дотримання цих заходів з охорони праці забезпечить безпечну експлуатацію дронів та їхніх компонентів і знизить ризик травмування, пошкодження обладнання та негативного впливу на навколишнє середовище. Це сприятиме ефективному та безпечному використанню дронів у різних сферах діяльності [14].

ВИСНОВКИ

За результатами розробили модуль для протидії електромагнітним перешкодам на прототипі безпілотної, щоб поліпшити якість зв'язку між дроном і панеллю управління. Спочатку зібрали і інтегрували всі необхідні компоненти, включаючи раму Mark4, контролер польоту SpeedyBee f405v3bls50a з системою Esc, двигун EMAX ECO II і камеру Caddx Ratel2V2FPV. Встановили та налаштували систему передачі відео за допомогою передавача jhemcu2.5W VTX5.8g40ch FPV та антени Foxeer Lollipop4v4. Щоб забезпечити стабільне управління дроном на частоті 915 МГц, використовували приймач elrs mini915 МГц RX sx1276expresslrs.

Однією з головних проблем, з якою зіткнулися, була нестабільність зв'язку в умовах високих електромагнітних перешкод. Щоб вирішити цю проблему, вирішили використати саморобну антену та підсилювач для покращення якості зв'язку. Спочатку виготовили кругову поляризовану двонаправлену антену, використовуючи мідну пластину, кабель RG402 та мідний дріт. Щоб забезпечити оптимальні параметри антени, виконали розрахунки довжин хвиль, поперечних перерізів і відстаней. Деталі були встановлені та спаяні з необхідною точністю для отримання необхідної частоти та коефіцієнта посилення.

Для підвищення стабільності зв'язку використовували радіочастотний модуль Vandal Micro EXPRESSLRS1W915 МГц в панелі управління. Це дозволило нам збільшити рівень сигналу та поліпшити стабільність зв'язку. Також оптимізували розташування компонентів і використовували екрановані кабелі, щоб зменшити вплив електромагнітних перешкод. У ньому також реалізований алгоритм динамічного регулювання потужності передавача, який може автоматично збільшувати або зменшувати потужність залежно від умов зв'язку. Використання алгоритмів стиснення і обробки даних дозволило більш ефективно використовувати пропускну здатність каналів зв'язку.

У результаті проведеної роботи значно поліпшена стабільність і якість зв'язку між дроном і пультом управління, що забезпечує надійне управління дроном навіть в умовах високих електромагнітних завад. Запропоновані та впроваджені рішення довели свою ефективність, що робить їх перспективними для подальшого використання та вдосконалення в майбутніх проєктах безпілотних літальних апаратів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка, освітньої програми «Інтелектуальні технології засобів радіоелектроніки» / Упоряд. Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. М. Замірець, В. В. Невлюдова, Ю. М. Олександров. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 38 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL:https://catalogue.nure.ua/document=154643.
3. Теорія автоматичного керування: навч. посіб. / В. О. Євстіфєєв, Д. Й. Родькін. – Кременчук, КДПІ, 2007. – 222 с.
4. Гоголюк П. Ф. Теорія автоматичного керування: навч. посіб. 2-ге вид., переробл. / П. Ф. Гоголюк, Т. М. Гречин. – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2012. – 280 с.
5. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Методичні вказівки та завдання розрахунково-графічної роботи: навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / О. М. Купрій, В. І. Найденко; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 25 с.
6. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Практикум: навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. І. Пільтяй; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 54 с.
7. Технічна електродинаміка. Конспект лекцій / Укл. В. В. Пілінський, П. В. Попович. – К.: Національний Технічний Університет України «КПІ», 2006. – 224 с.
8. Захарія Й. А. Методи прикладної електродинаміки. – Львів: «Бескид Біт», 2003. – 352 с.
9. Бючі, Р. Захоплення квадрокоптером. 1-е вид. [Електронний ресурс]. –

Режим доступу: www/URL: https://helpiks.org/6-70010.html

10. Антена Харченка. Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B0_%D0%A5%D0%B0%D1%80%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%B0.

https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B0_%D0%A5%D0%B0%D1%80%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%B0.

11. Офіційний сайт ExpressLRS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: https://www.expresslrs.org/.

12. Офіційний сайт ExpressLRS Configurator [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: https://github.com/ExpressLRS/ExpressLRS-Configurator/releases.

13. Налаштування дрону та його керування. BetaFlight [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: https://betaflight.com/.

14. Серeda О. Г. Європейські стандарти організації праці / О. Г. Серeda // Право та інновації. – 2015. – №4 (12). – С. 110-117.